Postverlagsort Würzburg 2

DIE NATURWISSENSCHAFTEN

BEGRÜNDET VON A. BERLINER UND C. THESING

UNTER BESONDERER MITWIRKUNG VON
ERICH v. HOLST

HERAUSGEGEBEN VON
ERNST LAMLA

BEIRAT:
J. BARTELS · E. BEDERKE · H. BROCKMANN · P. TEN BRUGGENCATE · C. W. CORRENS · H. v. FICKER
R. GRAMMEL · O. HAHN · R. HARDER · M. HARTMANN · W. HEISENBERG · K. HENKE · A. KÜHN
M. v. LAUE · H. MARTIUS · R. W. POHL · H. REIN

ORGAN DER MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT ZUR FÖRDERUNG DER WISSENSCHAFTEN
ORGAN DER GESELLSCHAFT DEUTSCHER NATURFORSCHER UND ÄRZTE

SPRINGER-VERLAG / BERLIN · GÖTTINGEN · HEIDELBERG

38. JAHRGANG **HEFT 4** (ZWEITES FEBRUARHEFT) **1951**

INHALT:

AUFSÄTZE. Seite

50 Jahre Relativitätstheorie. Von HERMANN WEYL 73
Theorie und Erfahrung in der Kosmologie. Von O. HECKMANN 84
Materie und Energie unter kosmischen Verhältnissen. Von H. KIENLE 92

KURZE ORIGINALMITTEILUNGEN.

Quantitative Absorptionsuntersuchungen an der sichtbaren Bande der Brom- und Joddämpfe. Von G. KORTÜM und W. LUCK 100
Die Brunstzeit (breeding season) bei Schafen in Beziehung zur Tageslänge in nördlicher und südlicher Breite. Von E. S. E. HAFEZ 100
Heteroplastische Transplantationen bei Holzpflanzen. Von S. HERRMANN 101
Eine Spinne als Glazialrelikt. Von HEINRICH HOMANN . . . 101
Ein neues Kapillarviskosimeter für hohe Drucke. Von E. KUSS 102

BESPRECHUNGEN. Seite

E. MADELUNG, Die mathematischen Hilfsmittel des Physikers. (Ref.: F. SAUTER) 103
LOUIS DE BROGLIE, Physik und Mikrophysik. (Ref.: E. TREFFTZ) 103
P. GOMBAS, Theorie und Lösungsmethoden des Mehrteilchenproblems der Wellenmechanik. (Ref.: JENSEN) 103
FRANZ KAINER, Kohlenwasserstoffsynthese nach FISCHER-TROPSCH. (Ref.: GRIMME) 103
EDWARD A. STEINHAUS, Principles of Insect Pathology. (Ref.: KLOFT) 104
WOLFGANG RIEZLER, Einführung in die Kernphysik. (Ref.: JENSEN) 104
HANS KALMUS, Einfache Experimente mit Insekten. (Ref.: H. AUTRUM) 104
Ergänzung und Berichtigung 104

Das Erstarkungswachstum krautiger Dikotylen
mit besonderer Berücksichtigung der primären Verdickungsvorgänge

Von
Wilhelm Troll und **Werner Rauh**
Mainz Heidelberg

(Sitzungsberichte der Heidelberger Akademie der Wissenschaften. Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse. Jahrgang 1950, 1. Abhandlung)

Mit 67 Textabbildungen. 86 Seiten. 1950. DMark 13.40

Inhaltsübersicht:

Einleitung. — A. Übersicht über die an der Achsenverdickung beteiligten Wachstumsvorgänge. — B. Erscheinungsformen des Erstarkungswachstums bei Monokotylen und Dikotylen, dargestellt an ausgewählten Beispielen. — C. Spezieller Teil: I. Das Erstarkungswachstum von Primärachsen. — 1. Erstarkungswachstum bei medullärer Primärverdickung. a) Erstarkungswachstum mit vollkommener Maskierung. b) Erstarkungswachstum mit unvollkommener Maskierung. c) Erstarkungswachstum mit fehlender Maskierung. — 2. Erstarkungswachstum bei kortikaler Primärverdickung. — II. Das Dickenwachstum vom Impatiens und ähnlich sich verhaltenden Dikotylen. — III. Das Erstarkungswachstum von Seitenachsen. — 1. Erstarkungswachstum bei medullärer Primärverdickung. a) Gewöhnliche Ausläufer. b) Knollenbildende Ausläufer. — 2. Erstarkungswachstum bei kortikaler Primärverdickung. — **D. Beziehungen zwischen Erstarkungswachstum, Internodienlänge und Organbildung des Achsenkörpers.** — Literaturverzeichnis.

SPRINGER-VERLAG / BERLIN · GÖTTINGEN · HEIDELBERG

DIE NATURWISSENSCHAFTEN

erscheinen zweimal monatlich. Bestellungen nimmt jede Buchhandlung, in den Westzonen auch jedes Postamt entgegen. Preis vierteljährlich 12.— DMark, für das einzelne Heft 2.50 DMark, zuzüglich Postgebühren. Die Mitglieder der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte erhalten die Zeitschrift bei direktem Bezug vom Verlag im Abonnement mit einem Nachlaß von 20%.

Nachdruck: Der Verlag behält sich das ausschließliche Recht der Vervielfältigung und Verbreitung aller in dieser Zeitschrift zum Abdruck gelangenden Beiträge sowie ihrer Verwendung für fremdsprachige Ausgaben vor.

Sonderdrucke: Den Verfassern von Originalbeiträgen und Kurzen Originalmitteilungen stehen 75 Exemplare kostenfrei zur Verfügung.

Anzeigen werden von der Anzeigenabteilung des Verlages (Berlin W 35, Reichpietschufer 20 [Britischer Sektor], Tel. 912937) angenommen. Die Preise wolle man unter Angabe der Größe und des Platzes erfragen.

Vertriebs-Vertretung im Ausland:

Lange, Maxwell & Springer Ltd., 41—45 Neal Street, London, W. C. 2

Springer-Verlag

Berlin · Göttingen · Heidelberg

Redaktionelle Hinweise.

I. Allgemeines.

1. Bei der Einsendung von Manuskripten an „Die Naturwissenschaften" bittet die Redaktion die Herren Autoren, stets im Auge zu behalten, daß die Zeitschrift in erster Linie den Wünschen und Interessen des weiten Kreises ihrer Leser zu dienen hat und daß daher ihnen gegenüber Sonderwünsche der Herren Autoren in bezug auf Inhalt, Form und Umfang ihrer Veröffentlichung zurücktreten müssen, falls die Redaktion dies für erforderlich hält.

2. Vor allem bittet die Redaktion, von der Einsendung von Aufsätzen Abstand zu nehmen, die nur für einen eng begrenzten Leserkreis verständlich und von Interesse sind, und die daher in einer Fachzeitschrift ihren richtigen Platz haben. Ausnahmen bilden knapp gefaßte Schilderungen der Ergebnisse eben fertiggestellter Arbeiten; für diese ist die Rubrik „KOM" („Kurze Originalmitteilungen") vorgesehen. Wegen Platzmangels sind allerdings auch hier gewisse Einschränkungen nötig. In bezug auf den Inhalt: Angenommen werden können nur wirklich wichtige Arbeiten (z. B. keine bloßen Analogiearbeiten). In bezug auf den Umfang: Im Durchschnitt kann für eine einzelne KOM nur der Raum einer Spalte (etwa 1000 Silben) zur Verfügung gestellt werden.

3. Die KOM erscheinen „unter ausschließlicher Verantwortung des Autors". Eine wissenschaftlich-kritische Stellungnahme der Herausgeber zu ihrem Inhalt erfolgt nicht. Die Redaktion prüft lediglich, ob ein genügendes Allgemein-Interesse vorliegt.

4. „Kurze Originalmitteilungen" aus dem englischen und französischen Sprachgebiet können in der Originalsprache veröffentlicht werden.

II. Spezielle Hinweise.

Alle Sendungen und Zuschriften sind zu richten an:

Redaktion der Naturwissenschaften,
(20b) Göttingen, Theaterplatz 10.

In sämtlichen Fällen erhalten die Autoren eine Bestätigung über das Eintreffen von Manuskripten sowie über deren Annahme oder Ablehnung. In den Aufsätzen sind seltene und nur einem kleinen Leserkreis verständliche Fachausdrücke nach Möglichkeit zu vermeiden oder in einer Fußnote kurz zu erläutern. Literaturzitate sind fortlaufend zu numerieren; die angeführten Arbeiten werden dann in einem Literaturverzeichnis am Schluß der Arbeit zusammengestellt. Bei Erläuterung des Textes durch Figuren ist überflüssiger Aufwand zu vermeiden. Figurenvorlagen für Strichätzungen sind so sorgfältig herzustellen, daß nach ihnen ohne weitere Rückfragen Reinzeichnungen angefertigt werden können. Diese werden zur Zeitersparnis den Autoren im allgemeinen nicht vorgelegt, sondern seitens der Redaktion kontrolliert.

Photographische Abbildungen (Autotypien) können gebracht werden, soweit sachlich erforderlich. In vielen Fällen läßt sich jedoch das Wesentliche durch eine (leichter reproduzierbare) Zeichnung ebensogut zeigen.

Korrekturen.

Die Autoren der Aufsätze, Berichte und Buchbesprechungen erhalten eine Fahnenkorrektur, deren umgehende Erledigung und Rücksendung erbeten wird.

Bei den KOM wird zur Beschleunigung des Erscheinens die Korrektur von Text und Abbildungen von der Redaktion besorgt, soweit nicht der Autor bei Einsendung des Manuskriptes ausdrücklich den Wunsch äußert, diese Arbeit selbst vorzunehmen. Bei KOM ohne Figuren soll hierdurch das Erscheinen innerhalb 4 Wochen nach Eingang bei der Redaktion ermöglicht werden.

Besprechungsexemplare.

Es wird gebeten, von der unverlangten Zusendung von Büchern, besonders kleineren Broschüren und Zeitschriften-Heften, abzusehen und zunächst eine Anfrage an die Redaktion zu richten, die dann von sich aus Exemplare anfordern wird. — Für die Rückgabe unverlangter Sendungen kann keine Gewähr übernommen werden.

Friedrich Nietzsches Naturbeflissenheit

Von **Alwin Mittasch**

(Sitzungsberichte der Heidelberger Akademie der Wissenschaften. Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse. Jahrgang 1950, 2. Abhandlung)

102 Seiten. 1950. DMark 8.80

Inhaltsübersicht:

Lebensdaten Nietzsches. — Nietzsches Schriften. — **A. Friedrich Nietzsches Stellung zu den Naturwissenschaften.** Einleitung. — I. Entwicklung von Nietzsches Naturwissen und Naturdenken. — Nietzsches naturwissenschaftliche Ausbildung in Schulpforta. — Nietzsches Beschäftigung mit Naturwissenschaften in den Studienjahren 1864—1869. — Nietzsches weitere naturwissenschaftliche Studien 1870—1888. — II. Nietzsches Beziehungen zu den einzelnen Naturwissenschaften: Mathematik, Physik, Astronomie, Mineralogie und Geologie, Chemie, Biologie, Anthropologie und Heilkunde, Psychologie. — III. Allgemeines. — Zur naturwissenschaftlichen Methodik und Erkenntnislehre. — Zur Metaphysik der Natur. — Schluß. — Anhang: Ärztliches und Augenärztliches. — **B. Friedrich Nietzsches naturwissenschaftlicher Briefwechsel mit Peter Gast:** Einleitung. — Die Jahre bis Zarathustra (1876—1884). — Die Jahre des Willens zur Macht und der Rangordnung (1885—1889). — Schluß. — Anhang: Aus Nietzsches Jugendentwicklung. — Literatur. — Personenverzeichnis.

SPRINGER-VERLAG / BERLIN · GÖTTINGEN · HEIDELBERG

DIE NATURWISSENSCHAFTEN

Jahrgang 38 Heft 4 (Zweites Februarheft) 1951

50 Jahre Relativitätstheorie *).

Von HERMANN WEYL.

Einleitung.

Die Historiker haben sich zuweilen der Einteilung des Geschichtsablaufs in Jahrhunderte so bedient, als wäre die Jahrhundertwende mehr als ein rein äußerlicher, durch unsere Zeitrechnung bedingter Einschnitt. So sprach und spricht man etwa vom Geist des 18. Jahrhunderts. Es ist, als wolle die Geschichte der neueren Physik diesem an sich so unwissenschaftlichen Brauch recht geben. Denn wie die Quantentheorie ziemlich genau mit dem Beginn des gegenwärtigen Jahrhunderts auf den Plan tritt, so wird um die Jahrhundertwende auch das Fundament der Relativitätstheorie in der Form gelegt, wie sie heute gilt, und die dadurch gekennzeichnet ist, daß die endliche Lichtgeschwindigkeit als die obere Grenze der Ausbreitungsgeschwindigkeit aller Wirkungen erscheint. Die historische Stufenfolge der speziellen und der allgemeinen Relativitätstheorie (SR und AR) ist auch sachlich wohl begründet. Freilich geht die SR in der AR auf, so wie ein näherungsweise in ein exakt gültiges Gesetz aufgeht. Aber jene so viel leichter zu handhabende Annäherung ist maßgebend für alle physikalischen Phänomene, in denen die Gravitation vernachlässigt werden kann, und spielt darum im aktuellen Betrieb der physikalischen Forschung, insbesondere der Atomforschung, die weitaus größere Rolle. Es ist ja eine der merkwürdigsten Tatsachen der Natur, daß die Gravitationsanziehung zweier Elektronen 10^{40}mal so klein ist wie ihre elektrostatische Abstoßung. Heute wird es wohl kaum einen Physiker geben, der daran zweifelt, daß die SR einen der wichtigsten und empirisch am sichersten gestützten Grundzüge der Natur wiedergibt. Anders steht es mit der auf einem viel schmaleren Erfahrungsfundament beruhenden AR, und wenn auch die meisten Physiker ihre Grundgedanken akzeptieren, so werden wenige anzunehmen geneigt sein, daß wir die allgemein invarianten Feldgesetze bereits in ihrer endgültigen Form besitzen. Ich brauche Ihnen nicht zu erzählen, daß in viel höherem Maße, als das in der Quantentheorie der Fall ist, Grundlagen und Ausbau der Relativitätstheorie das Werk eines Mannes sind: ALBERT EINSTEIN. Wie er, ungleich den meisten andern Physikern, sich seinerzeit mit der von ihm errichteten speziellen Relativitätstheorie nicht zufrieden gab und in einer an GALILEI und NEWTON gemahnenden Kombination von Empirie und Spekulation zur AR vorstieß, so ist er auch jetzt noch unablässig mit dem Problem einer einheitlichen, alle Naturkräfte umfassenden Feldtheorie beschäftigt [*1*].

A. Spezielle Relativitätstheorie.

1. Vorgeschichte und Begründung.

Als MAX PLANCK 1900 die Quanten zur Erklärung der Formel für die Energieverteilung im Spektrum der schwarzen Hohlraumstrahlung einführte, trat, so darf man sagen, mit der Quantentheorie auch das Quantenproblem zum erstenmal auf den Plan. Das Relativitäts*problem* aber ist viel älter als die im 20. Jahrhundert entstandene Relativitäts*theorie*, in welcher wir seine Lösung sehen. Schon ARISTOTELES definiert Ort (τόπος) relativ, nämlich als Beziehung eines Körpers zu den Körpern seiner Umgebung. LOCKE gab in seinem Hauptwerk eine eingehende erkenntnistheoretische Analyse [*2*], GALILEI illustriert die Relativität der Bewegung hübsch durch das Beispiel des Schreibers, der an Bord eines von Venedig nach Alexandrette segelnden Schiffes seine Notizen macht und dessen Feder „in Wahrheit", das ist relativ zur Erde, eine lange, glatte, nur leicht gewellte Linie beschreibt [*3*]. Offenkundig durch theologische Überzeugungen mitbestimmt, verkündet NEWTON am Beginn seiner Principia mit ehernen Worten die Lehre vom absoluten Raum und der absoluten Zeit. Er gibt das Beispiel zweier durch einen Faden verbundenen Kugeln, die um eine zum Faden senkrechte Mittelachse rotieren: die Spannung des Fadens zeigt Existenz und Geschwindigkeit der Rotation an. Allgemein stellt er sich die Aufgabe, aus den relativen Bewegungen der Körper und den bei der Bewegung auftretenden Kräften ihre absolute Bewegung zu bestimmen, und erklärt geradezu, daß sein *treatise* verfaßt wurde um der Lösung dieses Problems willen. „To this end it was that I composed it", heißt es am Schluß der Vorrede [*4*]. Gelingt ihm sein Vorhaben? Nicht völlig. Die von ihm aufgestellten Gesetze der Mechanik (und der Gravitation) gestatten wohl, die Bewegung eines Massenpunktes in gerader Linie mit konstanter Geschwindigkeit (gleichförmige Translation) von allen andern Bewegungen zu unterscheiden; hingegen gestatten sie nicht, unter den gleichförmigen Translationen die Ruhe auszuzeichnen. Um dies doch zu erreichen, nimmt NEWTON zu einer kosmologischen Hypothese und einer Begriffsunterschiebung seine Zuflucht, die sich gar fremd in dem sonst so wohlfundierten, herrlichen Aufbau der Principia ausnehmen. Seine Hypothese ist, daß das Weltall ein Zentrum habe und dieses sich in Ruhe befinde. Vom Schwerpunkt des Sonnensystems stellt er fest, daß es eine gleichförmige Translation ausführt, und fährt dann fort: „But if that center moved, the center of the world would move also against the hypothesis" [*5*]. Beides, die Hypothese vom ruhenden Zentrum des Weltalls und diese durch nichts begründete Identifizierung desselben mit dem Schwerpunkt des Sonnensystems, sind erstaunlich. NEWTONs Bild vom Kosmos ist offenbar noch wesentlich gebundener als das, welches schon 100 Jahre früher GIORDANO BRUNOs leidenschaftliche Seele erfüllte [*6*].

Raum und Zeit bilden ein vierdimensionales Kontinuum, das wir mit MINKOWSKI die *Welt* nennen. Ein raum-zeitlich eng begrenztes Ereignis geschieht an einer bestimmten Raum-Zeit-Stelle, in einem bestimmten Weltpunkt, „hier-jetzt". Nur raumzeitliche Koinzidenz oder unmittelbare raum-zeitliche Nachbarschaft ist etwas in der Anschauung unzweifelhaft

*) Vortrag, gehalten auf der Tagung der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte in München am 24. Oktober 1950.

Gegebenes. Ein Massenpunkt beschreibt eine eindimensionale Linie in der Welt. Wenn zwei Personen sich treffen und sich die Hand reichen, so geschieht das an einer bestimmten Raum-Zeit-Stelle, in welcher sich ihre Weltlinien schneiden. Weil kein Raumpunkt und kein Zeitpunkt von dem andern an sich physikalisch verschieden ist, entsteht das Problem NEWTONs, wie

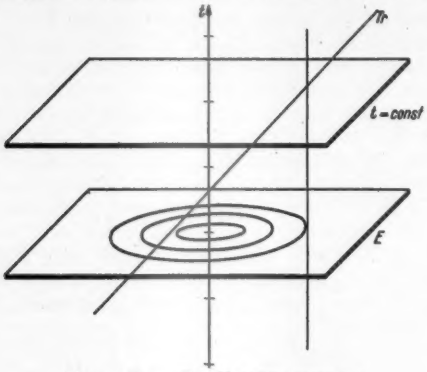

Abb. 1. Raum-Zeit-Koordinatensystem.

man von zwei Ereignissen entscheiden soll, ob sie am gleichen Ort (wenn auch zu verschiedenen Zeiten) oder zur gleichen Zeit (wenn auch an verschiedenen Orten) geschehen. Um ein graphisches Bild entwerfen zu

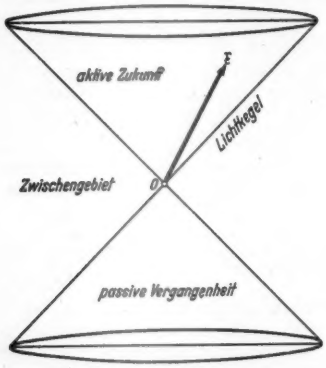

Abb. 2. Lichtkegel.

können, nehmen wir dem Raum eine Dimension, studieren also nur die Vorgänge auf einer horizontalen Ebene E und tragen im Bild die Zeit t senkrecht zu dieser Ebene E auf (Abb. 1). In unserem Bilde erscheinen gleichzeitige Weltpunkte als in einer Horizontalebene gelegen, gleichortige auf einer vertikalen Geraden. NEWTONs Glaube an einen absoluten Raum und an eine absolute Zeit bedeutet also, daß er der Welt eine Struktur zuschreibt, die sich in einer (horizontalen) Schichtung und einer quer dazu verlaufenden (vertikalen) Faserung ausdrückt. Durch jeden Weltpunkt geht eine Schicht und eine Faser. Raum und Zeit kommt ferner eine metrische Struktur zu, auf Grund deren wir von der Gleichheit von Raumstrecken und von Zeitintervallen sprechen. In unserem graphischen Bilde können wir das am anschaulichsten durch eine Schar konzentrischer Kreise in der Ebene E und eine Reihe äquidistanter Punkte auf der vertikalen Zeitachse veranschaulichen. Gibt das Bild in dieser Weise die metrischen Verhältnisse getreu wieder, so stellen (nichthorizontale) gerade Linien die möglichen gleichförmigen Translationsbewegungen dar.

Das *spezielle Relativitätsprinzip*, das sich aus der NEWTONschen Mechanik ergab und das NEWTON selber nur aus theologisch-spekulativen Gründen verleugnete, besagt, daß in einem in gleichförmiger Translation befindlichen Eisenbahnwagen alle Vorgänge genau so ablaufen, alle Tätigkeiten, wie Briefeschreiben oder Ballspielen, genau so ausgeführt werden können, wie wenn der Wagen ruhte; Störungen treten nur bei Beschleunigungen auf. Schon GALILEI hatte dieses Prinzip klar erkannt und entwickelt es in seinem *Dialogo sopra i dui massimi sistemi del mondo* [7]. Er faßt die Bewegung auf als einen Kampf zwischen *Trägheit und Kraft*; solange ein Körper durch keine äußeren Kräfte abgelenkt wird, beschreibt er eine gleichförmige Translation. In unserem graphischen Bild können wir diese Erkenntnis dahin aussprechen, daß wohl die geraden Linien unter allen andern ausgezeichnet sind, aber nicht die vertikalen Geraden.

An der objektiven Bedeutung der *Gleichzeitigkeit*, der „horizontalen Schichtung", hatte vor EINSTEIN niemand ernstlich gezweifelt. Indem es dem Menschen natürlich ist, anzunehmen, daß ein Ereignis dann geschieht, wenn er es beobachtet, dehnt er seine eigene Zeit auf die ganze Welt aus. Dieser naive Glaube war freilich durch OLAF RÖMERs Entdeckung der endlichen Lichtgeschwindigkeit erschüttert worden. Repräsentiert man in unserem graphischen Bild 1 sec auf der Zeitachse durch eine Strecke von derselben Länge wie die Raumstrecke in der Ebene E, die das Licht in 1 sec durchmißt, so wird die Ausbreitung eines in O gegebenen Lichtsignals durch einen geraden vertikalen Kreiskegel vom Öffnungswinkel 90° mit Spitze in O dargestellt (Abb. 2); er gibt den „Lichtkegel" wieder, auf welchem diejenigen Weltpunkte liegen, in denen das Signal eintrifft. Die Begriffe von Vergangenheit und Zukunft haben, wie LEIBNIZ nicht müde wurde zu betonen, kausale Bedeutung: durch „hier-jetzt", im Weltpunkt O, abgeschossene Kugeln kann ich CAIUS JULIUS CAESAR nicht mehr treffen, da seine Weltlinie ganz der vergangenen Welthälfte in bezug auf O angehört. Und man nahm an, daß es die Ebene $t = \text{const}$ durch O ist, welche diese Trennung in eine vergangene und zukünftige Welthälfte bewirkt. Die neue Erkenntnis, welche das 20. Jahrhundert brachte, war die, daß die Kausalstruktur der Welt nicht durch die ebenen Schichten $t = \text{const}$, sondern durch die von jedem Weltpunkt ausgehenden Lichtkegel beschrieben wird. Physikalisch heißt das, daß keine Wirkung sich mit größerer als Lichtgeschwindigkeit ausbreitet. Im Innern des „vorderen" von O ausgehenden Lichtkegels liegen alle Weltpunkte, auf die das, was in O geschieht, noch von Einfluß sein kann; im Innern des durch rückwärtige Verlängerung entstehenden hinteren Lichtkegels aber liegen alle Ereignisse, die auf das, was in O geschieht, möglicherweise von Einfluß waren, insbesondere solche, von denen ich jetzt hier, in O, eine auf direkte Wahrnehmung gegründete Kunde haben kann. Die beiden Teile des Kegels grenzen nicht zwischenraumlos aneinander; mit dem Zwischengebiet ist O kausal überhaupt nicht verbunden.

Wenn hier zur Beschreibung der Weltstruktur (unter Streichung einer Dimension) ein Bildraum Verwendung fand, von dem in den vertrauten geometri-

schen termini der euklidischen Geometrie gesprochen wurde, so geschah das nur im Interesse der leichteren Verständlichkeit. In Wahrheit brauchen wir zur begrifflichen Darstellung der Naturvorgänge eine Abbildung der Welt oder des in Frage kommenden Weltstücks auf ein Stück des vierdimensionalen *Zahlenraums*; dessen Punkte sind nichts anderes als die möglichen Zahlenquadrupel (x_1, x_2, x_3, x_4). Relativ zu einem solchen Koordinaten- oder Bezugssystem wird die Zeit eines Weltpunktes durch x_4, der Ort durch (x_1, x_2, x_3) angegeben; es legt in dieser Weise eine rein konventionelle Gleichzeitigkeit und Gleichortigkeit fest. Die Abbildung der Welt auf den Zahlenraum ist an sich ganz willkürlich; sie dient dazu, den Weltpunkten Namen zu geben. Das allgemeine Relativitätsprinzip ist so im Grunde nichts anderes als die Ablehnung des Namenzaubers, indem es behauptet, daß Ereignisse nicht davon berührt werden, in welcher Nomenklatur man sie beschreibt. Wenn eine Klasse von Koordinatensystemen objektiv herausgehoben werden soll, so kann dies nur dadurch geschehen, daß man von bestimmten physikalischen Vorgängen ausgeht und angibt, wie sie sich in einem Koordinatensystem dieser Klasse arithmetisch ausdrücken. So wird z. B. in EINSTEINs allgemein-relativistischer Gravitationstheorie das Gravitationsfeld eines Zentralkörpers gegebener Masse nach K. SCHWARZSCHILD durch bestimmte Formeln in einem Koordinatensystem dargestellt, das eben durch diese auf dasselbe bezogene Formeldarstellung weitgehend normiert ist.

Bisher haben wir uns von der NEWTONschen Ansicht über die Struktur der Welt zu einer solchen den Weg zu bahnen gesucht, die nicht in apriorischen Prinzipien, sondern auf Erfahrungen basiert ist. Nun müssen wir die so gewonnene Ansicht ohne den Umweg über NEWTON kurz systematisch darstellen. Wir benutzen zwei Grundvorgänge: die Ausbreitung eines Lichtsignals und die kräftefreie Bewegung eines Massenpunktes. Für diese gelten die folgenden beiden Grundgesetze, die, wie ich gleich bemerke, auch im Rahmen der allgemeinen Relativitätstheorie bestehen bleiben:

1. Der Lichtkegel in O, das ist der geometrische Ort der Weltpunkte, in denen ein in O gegebenes Lichtsignal eintrifft, ist durch O eindeutig bestimmt, unabhängig von dem Zustand, insbesondere dem Bewegungszustand der das Licht in O aussendenden Lichtquelle. (Dieses Gesetz wird häufig durch den etwas irreführenden Namen „Gesetz von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit" bezeichnet).

2. Die geodätische Weltlinie, die ein kräftefrei sich bewegender Massenpunkt beschreibt, ist durch Anfangspunkt und Anfangsrichtung in der Welt eindeutig bestimmt.

Die spezielle Relativitätstheorie ist auf die Annahme basiert, daß Bezugssysteme existieren, Abbildungen der Welt, in welcher sich diese Vorgänge in einer völlig determinierten Weise darstellen: nämlich die geodätischen Linien als gerade Linien und die Lichtkegel als Nullkegel, das ist als vertikale Kreiskegel vom Öffnungswinkel 90°. Ein solches normales Koordinatensystem ist nicht eindeutig bestimmt, sondern nur bis auf eine LORENTZ-*Transformation*; die Gruppe dieser Transformationen besteht aus allen solchen Abbildungen des Bildraums, welche Gerade in Gerade und Nullkegel in Nullkegel überführen. Es ist eine rein mathematische Aufgabe, diese Gruppe zu bestimmen. Die Theorie wird abgeschlossen durch die Behauptung, daß unter diesen gleichberechtigten Koordinatensystemen auch unter Berücksichtigung aller weiteren Naturvorgänge objektiv keine engere Auswahl getroffen werden kann: die Naturgesetze sind invariant gegenüber LORENTZ-Transformationen. Unter diesen Transformationen gibt es solche, den gegebenen Weltpunkt O festlassende, welche die vertikale Gerade durch O in eine beliebige zeitartige Gerade durch diesen Punkt überführen (d.h. in eine, die von O ins Innere des Nullkegels in O hineinführt): darin drückt sich das spezielle Relativitätsprinzip aus. MINKOWSKI erkannte, daß die Gruppe der LORENTZ-Transformationen mit der Gruppe der euklidischen Ähnlichkeiten zusammenfällt, wenn man sich nicht scheut, der einen Koordinate x_4 statt reeller rein imaginäre Werte zu erteilen. Die von der speziellen Relativitätstheorie der Welt zugeschriebene Trägheits- und Kausalstruktur ist darum von einer *metrischen Struktur* abzuleiten. Und zwar läßt sich die der Welt zukommende Geometrie, so wie die euklidische Raumgeometrie, auf den affinen Begriff des Vektors aufbauen, und wie in der euklidischen Geometrie bestimmen nach Wahl einer Maßeinheit je zwei Vektoren $\mathfrak{x}$, $\mathfrak{y}$ ein skalares Produkt $(\mathfrak{x} \cdot \mathfrak{y})$, das eine nichtausgeartete Bilinearform der beiden Argumente ist. Nur ist die zugehörige quadratische Form $(\mathfrak{x} \cdot \mathfrak{x})$, das „Quadrat der Länge" des Vektors $\mathfrak{x}$, nicht positivdefinit, $(\mathfrak{x} \cdot \mathfrak{x}) > 0$, sondern mit bezug auf eine geeignete Normalbasis $\mathfrak{e}_1, \mathfrak{e}_2, \mathfrak{e}_3, \mathfrak{e}_4$ für die Vektoren, die dem CARTESIschen Achsenkreuz in der euklidischen Geometrie entspricht, wird das Quadrat der Länge des Vektors $\mathfrak{x} = \sum x_k \mathfrak{e}_k$ durch die Formel

$$(\mathfrak{x} \cdot \mathfrak{x}) = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 - x_4^2$$

mit einem negativen Vorzeichen gegeben (quadratische Form der Signatur 1).

Den Zusammenhang dieser Weltgeometrie mit der physikalischen Messung von Raumstrecken durch starre Maßstäbe und von Zeitintervallen durch Uhren wollen wir erst im Zusammenhang der allgemeinen Relativitätstheorie kurz erläutern. An dieser Stelle nur zwei Bemerkungen darüber. Stößt man einen Eisenklotz gleichzeitig an verschiedenen Stellen an, so werden sich die Umgebungen dieser Stellen in Bewegung setzen; aber erst, wenn die mit Lichtgeschwindigkeit sich um die Stellen ausbreitenden Wirkungskugeln sich zu überlappen beginnen, werden diese Bewegungen sich gegenseitig beeinflussen. Diese einfache Bemerkung von Herrn VON LAUE zeigt, daß schon in der speziellen Relativitätstheorie der Begriff des starren Körpers im Prinzip hinfällig wird. — Die klassische Feldphysik läßt Körper beliebiger Ladung und Masse zu. Sie ignoriert damit, möchte man sagen, die Grundtatsache der Atomistik, daß die Materie aus Elementarteilchen fester Ladung und Masse besteht. In der Feldphysik erscheint darum auch die Wahl der Maßeinheit, in der Raum- und Zeitstrecken gemessen werden, als willkürlich; die Gruppe der LORENTZ-Transformationen umfaßt die Dilatationen. Die Unterscheidung von Ähnlichkeit und Kongruenz, auf die diese Bemerkung hinweist, ist häufig von Darstellern der Relativitätstheorie verwischt worden.

2. *Anfänge und Fortbildung der Theorie.*

a) Frühe Geschichte. Es ist meine Aufgabe, Ihnen ein Referat über die Entwicklung der Relativitätstheorie in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts zu erstatten. Es schien mir aber zweckmäßig, zunächst einen knappen systematischen Abriß der Theorie voranzustellen, in dem ich zugleich bemüht war, verkehrte Auffassungen abzuwehren. Holen wir nun in raschen Schritten die Historie nach [8]: Die optischen waren von MAXWELL den elektromagnetischen Erscheinungen eingegliedert worden; dementsprechend spielt die Lichtgeschwindigkeit c in den MAXWELLschen Gleichungen des elektromagnetischen Feldes eine wichtige Rolle. Solange man an einen substantiellen Lichtäther glaubte, wurde die aus diesen Gleichungen folgende Ausbreitung einer elektromagnetischen Störung mit Lichtgeschwindigkeit in konzentrischen Kugeln als eine Beschreibung des Vorganges relativ zu dem im Ganzen ruhenden Äther aufgefaßt. Dann mußte man aber erwarten, daß die Bewegung ponderabler Materie relativ zu diesem Äther sich durch bestimmte Effekte kundgeben würde. Die Erfahrung hingegen zeigte, daß das spezielle Relativitätsprinzip auch bei der Ausdehnung auf optische und elektromagnetische Vorgänge seine Richtigkeit behält. Aus der von ihm mitbegründeten Elektronentheorie heraus erschloß H. A. LORENTZ zuerst die Tatsache, daß alle Effekte 1. Ordnung in dem Verhältnis v/c zwischen Materie- und Lichtgeschwindigkeit für einen mitbewegten Beobachter herausfallen. Als weitere Versuche, wie der berühmte MICHELSONsche Interferenzversuch, auch das Fehlen von Effekten 2. Ordnung feststellten, nahm LORENTZ zu der Hypothese seine Zuflucht, daß ein Körper infolge seiner Bewegung gegen den Äther eine Längskontraktion im Verhältnis $1:\sqrt{1-(v/c)^2}$ erfährt. 1900 stellte er die heute allgemein als LORENTZ-Transformation bekannten Formeln auf. Die völlige Abklärung brachten dann drei Arbeiten von LORENTZ, H. POINCARÉ und EINSTEIN 1904/05. EINSTEIN nahm die grundsätzliche Wendung, daß er das spezielle Relativitätsprinzip als exakt gültig postulierte und nun zusah, welche Modifikationen für unsere Raum-Zeit-Vorstellungen resultieren, wenn man damit die elementaren Gesetze der Ausbreitung des Lichtes und der elektromagnetischen Wellen zusammenhält, und welche Gesetze für die Elektrodynamik bewegter Körper daraus folgen, wenn man die für ruhende Körper geltenden aus der (phänomenologischen) MAXWELLschen Theorie herübernimmt. Erst hierdurch kam es zu der radikalen Kritik des Begriffs der Gleichzeitigkeit. MINKOWSKI endlich gab die weltgeometrische Einkleidung, die insbesondere für die Weiterentwicklung zur allgemeinen Relativitätstheorie bedeutungsvoll wurde (Vortrag auf der Kölner Naturforscherversammlung 1908).

b) Elektrodynamik bewegter Körper. Leicht waren die *optischen* Konsequenzen des Relativitätsprinzips zu ziehen. Aus dem einfachen Umstand, daß die Phasendifferenz einer ebenen Lichtwelle in einem homogenen Medium an zwei Weltstellen A, B linear von dem Weltvektor $\overrightarrow{AB}$ abhängt, ergibt sich durch Vergleich zweier gleichberechtigter Spaltungen der Welt in Raum und Zeit die *Aberration* als Geschwindigkeitsperspektive, der DOPPLER-*Effekt* und der FIZEAU*sche Mitführungskoeffizient.* Betreffs Ableitung der elektromagnetischen Gleichungen für bewegte Körper sei die folgende methodische Bemerkung gemacht. Im Grunde gestattet das Prinzip, von ruhenden Körpern nur auf den Fall zu schließen, wo alle beteiligten Körper *dieselbe* gleichförmige Translation erfahren. In Wahrheit interessieren aber Aussagen über Situationen, in denen mehrere Körper mit verschiedenen Geschwindigkeiten auftreten. Nehmen wir den Fall zweier durch einen leeren Zwischenraum getrennter Körper, die sich (in unserem Bezugssystem) mit verschiedenen Geschwindigkeiten bewegen. Für den einzelnen Körper und den ihn umgebenden leeren Raum erhält man bestimmte Gleichungen, indem man die für den ruhenden Körper geltenden durch LORENTZ-Transformation in solche umwandelt, die relativ zu dem zugrunde liegenden Bezugssystem gelten. Indem man so für beide Körper verfährt, erhält man Gleichungen, die im leeren Zwischenraum miteinander übereinstimmen, da die MAXWELLschen Gleichungen im leeren Raum LORENTZ-invariant sind. Diese Gesetze kann man somit *ohne Widerspruch* als gültig annehmen, und man verwendet sie de facto als Näherungsgesetze, solange wenigstens die Distanz der beiden Körper nicht von molekularer Größenordnung ist. Die auf diese Weise von LORENTZ, EINSTEIN, MINKOWSKI, BORN u. a. gezogenen Konsequenzen haben sich durchweg in der Erfahrung bewährt.

c) Mechanik. Energie und Trägheit. In der Mechanik haben wir es mit Körpern zu tun, bei denen wir den von einem mitbewegten Beobachter zu messenden *inneren Zustand* von dem durch seine vektorielle Geschwindigkeit $\mathfrak{v}$ bestimmten *Bewegungszustand* unterscheiden können. Wir betrachten die Körper nur im Zustand gleichförmiger Translation. Das Impulsgesetz besagt, daß einem solchen Körper ein vektorieller *Impuls* $\mathfrak{J}$ zukommt, welcher der Geschwindigkeit parallel ist, $\mathfrak{J}=m\mathfrak{v}$, und daß vor und nach einer Reaktion die Summe der Impulse der beteiligten Körper die gleiche ist. Der skalare Faktor m ist die träge Masse; so war dieser Begriff im Grunde schon von GALILEI und HUYGENS eingeführt worden. Durch das Relativitätsprinzip erkennt man, daß das Impulsgesetz das weitere zur Folge hat, nach welchem auch die Massensumme $\sum m$ durch eine Reaktion sich nicht ändert. Indem man den Vorgang von zwei völlig gleich beschaffenen Körpern, die mit entgegengesetzt gleichen Geschwindigkeiten $\pm\mathfrak{v}$ gegeneinander gejagt werden und sich dabei zu einem einzigen, notwendig ruhenden Körper vereinigen, von einem beliebigen normalen Bezugssystem aus studiert, erkennt man bei Zugrundelegung der GALILEIschen Kinematik, die aus der EINSTEINschen durch den Grenzübergang zu $c\to\infty$ entspringt, daß die Masse von dem Bewegungszustand und infolgedessen auch von dem inneren Zustand eines Körpers unabhängig ist. Hingegen ergibt sich auf Grund der EINSTEINschen Kinematik die Formel

$$m=\frac{m_0}{\sqrt{1-v^2}},$$

wo m_0 die nur vom inneren Zustand abhängige Ruhmasse, v der Betrag der Geschwindigkeit ist und $c=1$ gesetzt wurde. Messungen an Kathodenstrahlen bestätigten die Formel um so genauer, je mehr sich die Messungsmethoden verbesserten. Man versteht aus dieser Formel, daß der Trägheitswiderstand eines Körpers mit seiner Geschwindigkeit so anwächst, daß

diese niemals die Lichtgeschwindigkeit erreicht. Die Veränderung der Masse mit dem Bewegungszustand des Körpers hat zur Folge, daß sie auch von inneren Zustandsänderungen beeinflußt wird, z. B. bei Erwärmung eines Körpers einen Zuwachs erfährt. Natürlich ist die Massenänderung des Körpers unabhängig davon, *wie* diese Zustandsänderung zustande kommt. Zusammen mit dem Faktum, daß für ein abgeschlossenes Körpersystem die Summe der Massenänderungen verschwindet, zeigt dies an, erstens, daß träge Masse und Energie dasselbe sind, und zweitens, daß das Energiemaß einer Zustandsänderung als die Differenz von den einzelnen Zuständen zukommenden *Energieniveaus* aufzufassen ist. Dieses Gesetz von der Trägheit der Energie, das sich in den üblichen Einheiten in der heute so populär gewordenen Formel, Energie $E = mc^2$, ausdrückt, ist zweifellos die wichtigste Folgerung aus der Relativitätstheorie; sie wurde von EINSTEIN schon in seiner ersten Arbeit 1905 gezogen, und schon damals faßte er die Anwendung derselben auf Kernreaktionen ins Auge, bei denen der der freiwerdenden Energie entsprechende Massendefekt meßbare Größenordnung erreichen mag. Das ist ein Gebiet, das inzwischen ins Zentrum der Forschung gerückt ist, von dem damals aber nur die Erscheinungen des spontanen radioaktiven Zerfalls bekannt waren. Um die Größenordnung zu kennzeichnen, gebe ich als Beispiel die Bildung eines Lithium-Atoms aus drei Protonen und drei Neutronen; die Masse (das Atomgewicht) des Lithiums ist 6,01692, der Massendefekt 0,03432, entsprechend einem Energieverlust von $5{,}11 \cdot 10^{-5}$ erg je Atom. Die MAXWELLsche Theorie schreibt dem elektromagnetischen Felde Dichte und Stromdichte der Energie und des Impulses zu. Ein Stück des Feldes ist nicht ein „Körper", an dem man Bewegungs- und inneren Zustand unterscheiden kann. Hier drückt sich das Gesetz von der Trägheit der Energie darin aus, daß der Energiestrom gleich der Impulsdichte ist. An dem Beispiel eines ruhenden Körpers, der eine kugelförmige Lichtwelle vom Impuls 0 aussendet, entdeckte EINSTEIN zuerst das Gesetz von der Trägheit der Energie, indem er feststellte, daß die ausgesandte Energie durch eine entsprechende Abnahme der trägen Masse des lichtaussendenden Körpers kompensiert werden muß. Er erkannte sogleich, daß dies Gesetz dieselbe universelle Gültigkeit besitzt wie das Relativitätsprinzip, aus dem es zwingend hervorgeht.

3. *Verbindung mit der Quantentheorie.*

In eine neue Epoche tritt die SR ein durch ihre Verbindung mit der das atomare Geschehen beherrschenden *Quantentheorie*, wie sie in mathematisch präziser Form um 1925 von HEISENBERG und SCHRÖDINGER aufgestellt wurde [*10*]. Die Verbindung ist nicht ohne Schwierigkeiten zu vollziehen. Die als Funktion von Ort (x_1, x_2, x_3) und Impuls (p_1, p_2, p_3) ausgedrückte Energie p_4, welche nach den HAMILTONschen Gleichungen der klassischen Mechanik die Bewegung eines freien Elektrons bestimmt, lautet

$$p_4 = \sqrt{m^2 + (p_1^2 + p_2^2 + p_3^2)},$$

wo m die konstante Ruhmasse ist. Bei der quantentheoretischen Übersetzung dieses Ausdrucks, bei welcher p_k durch den Operator $\frac{\hbar}{i}\frac{\partial}{\partial x_k}$ zu ersetzen ist ($i = \sqrt{-1}$, $\hbar$ die durch einen Faktor 2π modifizierte PLANCKsche Wirkungskonstante), macht die Quadratwurzel Schwierigkeiten. Schreibt man aber die Gleichung in ihrer rationalen Form,

$$p_4^2 - (p_1^2 + p_2^2 + p_3^2) = m^2, \tag{1}$$

welche die relativistische Invarianz unmittelbar in Evidenz setzt, so ergibt die Übertragung nicht die von der Quantentheorie allgemein vorgeschriebene Form. DIRAC überwand dieses Hindernis durch die den Mathematikern wohlbekannte, aber in ihren Händen unfruchtbar gebliebene Bemerkung, daß die quadratische Form der Variablen p_k auf der linken Seite von (1) sich mit Hilfe gewisser hyperkomplexer Zahlen γ_k, deren Multiplikation nicht kommutativ ist, als das Quadrat einer Linearform $\sum_k \gamma_k p_k$ schreiben läßt, und er setzte darum die Gleichung an

$$\sum_k \gamma_k p_k = m,$$

die der quantenmechanischen Übersetzung keine Schwierigkeiten in den Weg legt [*11*]. Die Physiker müssen mir verzeihen, wenn ich hier um der Kürze willen diese reichlich abstrakte Fassung von DIRACs Grundidee wähle. Gemäß seinem Ansatz wird das Wellenfeld des Elektrons nicht durch eine skalare Funktion ψ der vier Weltkoordinaten x_k beschrieben, sondern durch eine Größe mit vier Komponenten ψ_q, die sich unter dem Einfluß einer LORENTZ-Transformation der Koordinaten in einer ungewöhnlichen, in der üblichen Vektor- und Tensorrechnung nicht vorgesehenen Weise transformieren. Ein gemeinsamer konstanter Phasenfaktor $e^{-i\lambda}$ vom absoluten Betrag 1 bleibt in den ψ_q unbestimmt. Aus dem HAMILTONschen Prinzip entnimmt man ferner die Regel, daß man das auf das Elektron einwirkende elektromagnetische Feld einfach dadurch berücksichtigen kann, daß man die Operatoren $\frac{\partial}{\partial x_k}$ durch $\frac{\partial}{\partial x_k} + i\varphi_k$ ersetzt, wo φ_k die mit $\varepsilon/\hbar$ multiplizierten Komponenten des elektromagnetischen Potentials sind (ε = elektrische Elementarladung). Diese Dinge werden hernach im Rahmen der AR unter dem Titel Eichinvarianz von besonderer Wichtigkeit werden. Die geschilderte LORENTZ-invariante DIRACsche Theorie des Elektrons gibt in wunderbarer Weise Rechenschaft über den aus der Analyse der Atomspektren von S. GOUDSMIT, G. E. UHLENBECK und W. PAULI erschlossenen *Elektronenspin*, über den anomalen ZEEMANN-Effekt, die Feinstruktur des Wasserstoffspektrums und viele andere Dinge. Man kann wohl sagen, daß die Tatsachen der Spektroskopie heute die zuverlässigste Stütze für das Relativitätsprinzip abgeben.

Der DIRACsche Erfolg ist um so bemerkenswerter, als bei dem Übergang von einem Teilchen, Photon oder Elektron, zu einer unbestimmten Anzahl von in Wechselwirkung miteinander stehenden Photonen und Elektronen die Verschmelzung von Quanten- und Relativitätstheorie auf Hindernisse stößt, die, trotz vielversprechender Ansätze, noch nicht aus dem Wege geräumt werden konnten. Ich glaube aber, niemand denkt daran, deswegen der Relativitätstheorie den Laufpaß zu geben; sie ist dafür zu fest in dem ganzen Gebäude unserer theoretischen Physik verankert.

B. Allgemeine Relativitätstheorie.

1. Der Grundgedanke.

Es ließ sich nicht vermeiden, daß ich hier für einen Augenblick das Gebiet der gestrigen Vorträge, die Quantentheorie[1]), berührte. Aber nun ist es höchste Zeit für mich, von der speziellen zur allgemeinen Relativitätstheorie überzugehen. Es wurde schon oben gesagt, daß wir zur begrifflichen Beschreibung der Naturvorgänge die Weltpunkte auf Koordinaten beziehen müssen, daß aber die Erscheinungen selber durch diese an sich willkürliche Namengebung natürlich nicht beeinflußt werden. Der Übergang von einem zu einem andern Koordinatensystem geschieht durch eine (stetige) Koordinatentransformation. Von was für Gesetzen auch immer die Natur beherrscht sein mag, ich kann deren Formulierung ein willkürliches Koordinatensystem zugrunde legen, und sie werden alsdann invariant sein gegenüber beliebigen Koordinatentransformationen. Freilich muß ich dabei das Trägheits- und Kausalfeld oder das metrische Feld, aus dem beide abgeleitet werden, mit unter die physikalischen Zustandsgrößen aufnehmen. Das Prinzip der Invarianz gegenüber beliebigen Koordinatentransformationen ist also an sich nichtssagend, und der physikalisch entscheidende Gedanke, der von der speziellen zur allgemeinen Relativitätstheorie führt, liegt denn auch woanders als in diesem Prinzip. Die Einsicht in die Relativität des Ortes scheint uns zu zwingen, alle Bewegungszustände und nicht nur die gleichförmigen Translationen als gleichwertig zu erachten. So haben denn schon zu NEWTONs Zeit Denker wie LEIBNIZ und HUYGENS, später EULER, sich um das Rätsel bemüht, was der offenkundigen dynamischen Ungleichwertigkeit der kinematisch gleichwertigen Bewegungszustände zugrunde liegt. In neuerer Zeit war es ERNST MACH, der mit allem Nachdruck das allgemeine Prinzip der Relativität der Bewegung verfocht, und das Studium von MACH (neben dem von HUME) war auf EINSTEIN nach seinem eigenen Geständnis von maßgebendem Einfluß [*12*].

Wir haben als Trägheitsfeld diejenige Struktur der Welt bezeichnet, die einem Körper eine durch Anfangsort und -richtung in der Welt eindeutig bestimmte Bewegung aufnötigt, in der er zu beharren bestrebt ist, solange er nicht durch äußere Kräfte abgelenkt wird. Die wirkliche Bewegung resultiert aus dem Kampf zwischen Trägheit (Beharrungstendenz) und Kraft. Lassen Sie mich an ein Beispiel anknüpfen, das, wenn ich mich recht besinne, PHILIPP LENARD auf der Naturforscherversammlung in Bad Nauheim 1920 in die Diskussion über Relativitätstheorie hineinwarf: Ein Zug stößt mit einem entgegenfahrenden Zuge zusammen, während er an dem Kirchturm eines Dorfes vorüberfährt; warum, fragte LENARD, geht der Zug in Trümmer, und nicht der Kirchturm, wo doch der Kirchturm relativ zum Zug einen ebenso starken Bewegungsruck erfährt wie der Zug relativ zum Kirchturm? Die unvoreingenommene, von keiner Relativitätstheorie angekränkelte Antwort ist wohl klar: der Zug wird zerrissen durch den Konflikt seiner eigenen Trägheit mit den auf ihn von dem zusammenstoßenden Zug ausgeübten Molekularkräften; während der Kirchturm ruhig der ihm durch das Trägheitsfeld vorgeschriebenen Bahn folgt. In dem von der SR aufgestellten, bis auf eine LORENTZ-Transformation normierten Koordinatensystem erscheint das Trägheitsfeld als eine starre, der Welt ein für allemal innewohnende geometrische Beschaffenheit: während es enorme Wirkungen auf die Materie ausübt, ist es selbst über alle Einwirkungen der Materie erhaben. Dagegen sträubt sich unser Gerechtigkeitsgefühl: was Wirkungen auf die Materie ausübt, muß auch Wirkungen von ihr erleiden. Wo aber sind in der Natur Anzeichen dafür vorhanden, daß das Trägheitsfeld nicht vorgegeben, sondern den Einwirkungen der Materie gegenüber nachgiebig ist? Hier setzt EINSTEINs fundamentaler Gedanke ein: die *Gravitation* ist dieses Anzeichen. Wenn dies stimmt, wenn in dem Dualismus von Kraft und Trägheit die Gravitation auf die Seite der Trägheit gehört, so würde auf einmal die seltsame Tatsache der *Übereinstimmung von schwerer und träger Masse* verständlich, die durch die feinsten Messungen immer wieder bestätigt wurde. Die Kraft, mit welcher ein elektrisches Feld an einem geladenen Körper angreift, ist seiner Ladung proportional; so ist die Kraft, mit welcher das Gravitationsfeld an einem Körper angreift, seinem Gewicht = schwerer Masse proportional. Aber während die elektrische Ladung ponderabler Körper in keiner Weise mit ihrer trägen Masse zusammenhängt, stimmt merkwürdigerweise ihre schwere Masse, ihre Gravitationsladung, stets mit der trägen Masse überein. Ist EINSTEINs Erklärung richtig, welche die Schwerkraft auf eine Linie mit der Zentrifugalkraft stellt, so müssen wir die an sich unbefriedigende Vorstellung eines fest vorgegebenen Trägheitsfeldes fallen lassen und müssen statt dessen nach Differentialgesetzen suchen, welche das Trägheits- = Schwere-Feld so mit den vorhandenen Massen verknüpfen wie die MAXWELLschen Gleichungen das elektromagnetische Feld mit den dasselbe erzeugenden Ladungen. Dies war das Programm, welches EINSTEIN konzipierte.

Zu seiner Durchführung war er gezwungen, mit beliebigen Koordinaten und allgemeinen invarianten Differentialgleichungen zu operieren. In mathematisch zwingender Weise ergaben sich dabei die Feldgleichungen der Gravitation, die an Stelle des NEWTONschen Gravitationsgesetzes treten. So sehr ihre mathematische Form von der NEWTONschen abweicht, führen sie doch in großer Annäherung zu den gleichen Resultaten. Nur drei kleine Abweichungen erreichen ein der Beobachtung zugängliches Maß: eine Störung des Merkur-Perihel, die sich über die von den andern Planeten der NEWTONschen Theorie gemäß verursachten Störungen überlagert [*13*], die Ablenkung eines nahe an der Sonne vorübergehenden Lichtstrahles und die Rotverschiebung der Spektrallinien im Gravitationsfeld. In allen Fällen ergaben die Messungen Übereinstimmung mit der EINSTEINschen Voraussage innerhalb der Fehlergrenzen. Die eklatanteste Bestätigung wird vielleicht von den Spektren jener Zwergsterne von enormer Dichte geliefert, von denen der lichtschwache Begleiter des Sirius ein Beispiel ist. Nach meiner Meinung hat der EINSTEINsche Grundgedanke, der mit einem Schlage das alte Rätsel der Bewegung löst, in Kombination mit diesen empirischen Resultaten, eine solche Durchschlagskraft, daß ich nicht glauben kann, daß man je zur speziellen Relativitätstheorie mit ihrer festen metrischen Trägheits- und

[1]) Vgl. die Vorträge von W. HEISENBERG, M. VON LAUE und P. HARTECK, Naturwiss. 38, 49ff. (1951).

Kausalstruktur zurückkehren wird; wozu neuerdings E. A. MILNE und G. D. BIRKHOFF uns verleiten wollten [*14*].

Die EINSTEINsche Lösung des Bewegungsproblems lehrt, daß es überhaupt nicht um den Gegensatz von absoluter und relativer Bewegung geht. Läßt man beliebige Koordinaten zu, so kann man nicht nur einen, sondern alle in der Welt vorhandenen Massenpunkte simultan auf Ruhe transformieren; der Begriff der relativen hat so gut wie der der absoluten Bewegung seinen Sinn verloren. Dagegen bleibt die dynamische Auszeichnung der geodätischen Weltlinien als der reinen Trägheitsbewegung bestehen, aber das sie bestimmende metrische Feld steht in Wechselwirkung mit der Materie: GALILEIs dynamische Auffassung der Bewegung erfährt dadurch eine konkretere Deutung. Solche Spekulationen wie die von MACH, wonach die Sterne des Weltalls die Ebene des FOUCAULTschen Pendels führen, die der Ausbildung der Theorie vielleicht Vorschub geleistet haben, sollte man nicht länger mit dem nüchternen physikalischen Gehalt der Theorie vermengen. Freilich ist es eine Tatsache, daß in einem geeigneten Koordinatensystem das die Gravitation mitumfassende metrische Feld wenig von dem homogenen Zustand abweicht, der durch die MINKOWSKIsche Geometrie beschrieben wurde. Gebrauchen wir mit EINSTEIN das alte Wort *Äther* für das metrische Feld, so würde dies darauf hinweisen, daß in der Wechselwirkung von Äther und Materie der Äther zwar kein die Materie bewegender und von ihr unbewegter Gott ist, aber doch ein übermächtiger Riese, und daß hierauf das nahe Zusammengehen von Trägheitskompaß und Sternenkompaß beruht.

2. *Mathematischer und physikalischer Ausbau.*

RIEMANN hatte, nach dem Muster der GAUSSschen Behandlung krummer Flächen, in der Mitte des 19. Jahrhunderts eine Infinitesimalgeometrie n-dimensionaler Mannigfaltigkeiten ausgebildet. Dieses Werkzeugs konnte sich EINSTEIN bei der Durchführung seiner Theorie bedienen. Die Linienelemente, welche einen Punkt P der Mannigfaltigkeit mit den unendlich benachbarten Punkten P' verbinden, bilden die unendlich kleinen Vektoren des dem Punkte P zugehörigen Vektorkompasses. In der Tat erleiden bei beliebiger Transformation der Koordinaten x_k die Differentiale dx_k, die relativen Koordinaten des variablen Nachbarpunktes P' mit Bezug auf den festen Punkt P, lediglich eine *lineare* Transformation. Indem RIEMANN im Unendlichkleinen die Gültigkeit der euklidischen Geometrie, das ist im wesentlichen des pythagoreischen Lehrsatzes annimmt, kann er in allgemein invarianter Weise dem Linienelement mit den Komponenten dx_k eine *Länge* ds zuschreiben, deren Quadrat eine positive quadratische Form der dx_k ist,

$$ds^2 = \sum_{i,j} g_{ij}\, dx_i\, dx_j;$$

die Koeffizienten g_{ij} hängen vom Punkte P ab. EINSTEIN konnte diesen Ansatz ohne weiteres für die vierdimensionale Welt übernehmen, mit dem Unterschied natürlich, daß hier die quadratische Form nicht definit ist, sondern die Signatur 1 besitzt. Der symmetrische Tensor mit den 10 Komponenten $g_{ij} = g_{ji}$ beschreibt das *metrische Feld* und figuriert zugleich als *Gravitationspotential*. Das metrische Feld bestimmt eindeutig die infinitesimale Parallelverschiebung eines beliebigen Vektors in P nach den unendlich benachbarten Punkten P' und damit den *affinen Zusammenhang* der Welt, welcher durch die 40 CHRISTOFFELschen Drei-Indizes-Symbole $\Gamma^i_{kl} = \Gamma^i_{lk}$ (die Komponenten des Gravitationsfeldes) beschrieben wird. Aus ihnen entspringt durch abermalige Differentiation der RIEMANNsche *Krümmungstensor* vom Range 4 (das ist mit vier Indizes). Das Wort Krümmung hat hier oft zu Mißdeutungen Anlaß gegeben, und man sollte in der Tat diesen Tensor lieber Vektorwirbel nennen. Führt man nämlich die Vektoren des Kompasses in P durch fortgesetzte infinitesimale Parallelverschiebung längs einer nach P zurückführenden Kurve herum, so kehrt der Kompaß nicht in seine Anfangslage, sondern in einer dieser gegenüber verdrehten Lage zurück; die Vektorübertragung ist, wie man sagt, nicht integrabel. Eben diese Drehung gibt der Vektorwirbel an. Wenn er verschwindet, hat der RIEMANNsche Raum oder die EINSTEINsche Welt die besondere homogene, ihr durch die euklidische bzw. MINKOWSKIsche Geometrie zugeschriebene Struktur. Nach dem EINSTEINschen Gravitationsgesetz ist aber dieser Tensor oder vielmehr ein daraus durch die mathematische Operation der Kontraktion hervorgehender Tensor R_{ik} vom Range 2 nicht Null, sondern gleich dem die Materieverteilung kennzeichnenden Energie-Impuls-Tensor, multipliziert mit einer universellen Konstanten, der *Gravitationskonstanten* $\varkappa$.

Ich hoffe, ich habe hier vom Aufbau der Relativitätstheorie ein die wesentlichen Zusammenhänge leidlich getreu wiedergebendes Bild entworfen. Natürlich mußte ich simplifizieren. So einfach, wie es hier erscheinen mag, ist die Beziehung zwischen Erfahrung und Theorie nicht; so leicht hat es die Natur dem Forscher nicht gemacht, von den beobachtbaren Größen zu den Fundamentalgrößen vorzudringen, auf welchen die Theorie aufgebaut werden muß! Lassen Sie es mit dieser allgemeinen Verwahrung sein Bewenden haben, und lassen Sie mich nun zum Ausbau und dann zu dem im Laufe der letzten Jahrzehnte vorgenommenen Erweiterungen der AR übergehen.

Beim Ausbau macht die Einführung von *Dichte und Stromdichte von Energie und Impuls der Gravitation* eine gewisse Schwierigkeit. Es liegt ja geradezu in dem von EINSTEIN erkannten Wesen der Gravitation, daß sich das Gravitationsfeld, die Komponenten Γ des affinen Zusammenhangs, lokal „wegtransformieren" lassen; damit müssen dann auch jene Energie-Impuls-Größen zum Verschwinden kommen. Dennoch ergibt sich durch Integration ein nichtverschwindender Totalbetrag von invarianter Bedeutung [*15*]. Wie die aktive elektrische Ladung eines Teilchens durch den Fluß definiert werden kann, den das elektrische Feld durch eine das Teilchen umschließende gedachte Hülle sendet, so kann auch die *aktive*, die gravitationsfeld-erzeugende *Masse* als Fluß des Gravitationsfeldes durch eine solche Hülle gewonnen werden. Die Berechnung des Impulsstromes ergibt im elektromagnetischen Feld, daß die aktive Ladung zugleich als passive Ladung auftritt, an der die elektrischen Kräfte angreifen; dasselbe Verfahren liefert im Gravitationsfeld die Gleichheit von aktiver und passiver oder schwerer Masse.

Hiermit hängt eine andere wesentliche Leistung der allgemeinen Relativitätstheorie zusammen: die

Herleitung der Bewegungsgleichungen eines mit Ladung und Masse begabten Teilchens aus den Feldgleichungen. Gestatten Sie mir, mich einer Ausdrucksweise zu bedienen, welche die vierdimensionale Welt mit ihrem metrischen Feld durch eine ziemlich, aber doch nicht völlig ebene zweidimensionale Fläche ersetzt. Darin beschreibt ein Teilchen wie ein Elektron eine feine, aber tiefe Furche. Wir wissen nicht, was diese Furche birgt, doch ihre Böschung ist uns zugänglich. Ohne uns also Gedanken über die innere Konstitution des Teilchens zu machen, kennzeichnen wir das Teilchen durch das dasselbe umgebende lokale Feld. Indem wir ausdrücken, daß dieses Feld sich in den Gesamtverlauf des den Feldgleichungen unterworfenen Feldes einbettet, erhalten wir die Bewegungsgleichungen [*16*].

Es ist nicht richtig, daß das Wirkungsprinzip, aus welchem die EINSTEINschen Gravitationsgesetze entspringen, durch die Forderung der Invarianz (zusammen mit der Forderung einer möglichst niedrigen Differentiationsordnung) *völlig* eindeutig bestimmt ist. Zu der von EINSTEIN ursprünglich angenommenen Wirkungsgröße kann ein zweites, besonders einfach gebautes Glied, mit einer willkürlichen Konstanten Λ multipliziert, hinzugefügt werden. EINSTEIN führte dieses „*kosmologische Glied*" zuerst ein, um den schon von der NEWTONschen Theorie her bekannten Schwierigkeiten zu entgehen, die sich aus der Annahme eines im großen ganzen gleichförmig mit Sternen erfüllten unendlichen Weltraums ergeben. Später hat er dieses sein Kind wieder verleugnet; aber man wird es wohl in der Diskussion der kosmologischen Fragen zulassen müssen, solange kein zwingender formaler oder empirischer Grund für seine Ausschließung ersichtlich ist. Die Ohnmacht der Gravitation im Haushalt der Atome wurde am Beginn durch eine reine Zahl 10^{40} ausgedrückt. Die ungewöhnliche Größenordnung dieser Zahl hat zu Spekulationen Anlaß gegeben, die sie mit dem Mißverhältnis zwischen Ausdehnung oder Masse der Elementarteilchen einerseits, des Universums andererseits, und damit letzten Endes mit der zufälligen Anzahl der in der Welt vorhandenen Teilchen zusammenbringen, oder die in der Gravitationskonstanten $\varkappa$ eine von dem Alter des Universums abhängige und mit ihm veränderliche Größe sehen. Aber dies sind Fragen, deren Diskussion ich gerne meinem Nachfolger an diesem Pult überlasse.

3. *Versuche einer einheitlichen Feldtheorie.*

Die MAXWELLschen Gleichungen für das elektromagnetische Feld im leeren Raum fließen aus einem sehr einfachen Wirkungsprinzip, das sich sofort von der speziellen in die allgemeine Relativitätstheorie übertragen läßt. Aber beide Felder, das metrische oder Gravitationsfeld und das elektromagnetische, stehen unverbunden nebeneinander. Es entstand natürlicherweise das Desideratum einer einheitlichen Feldtheorie, welche alle Erscheinungen umspannt. Von vornherein verband sich damit die Hoffnung, durch eine solche Theorie auch die atomare Konstitution der Materie erklären zu können. Noch vor der Entstehung der AR und mit Beschränkung auf die elektromagnetischen Erscheinungen hatte GUSTAV MIE 1912 das Programm einer reinen Feldtheorie der Materie entworfen. Das Ziel, das ihm vorschwebte, war, die MAXWELLschen Gleichungen so zu modifizieren, daß sie eine oder wenige singularitätenfreie statische kugelsymmetrische Lösungen besitzen; diese würden dann dem Elektron und den Atomkernen der in der Natur vorkommenden Elemente entsprechen. DAVID HILBERT hatte zur selben Zeit, als EINSTEIN seine Grundgleichungen des Gravitationsfeldes aufstellte, dieses MIEsche Programm auf die allgemeine Relativitätstheorie übertragen [*17*]. EINSTEIN selber war weise genug, in seiner Fassung der Gravitationsgleichungen dem Beispiel der NEWTONschen Theorie zu folgen: wie hier in der Gleichung $\Delta\Phi = k\varrho$ für das Gravitationspotential Φ auf der rechten Seite die (mit der Gravitationskonstanten k multiplizierte) Massendichte ϱ auftritt, so stellte er auf die rechte Seite seiner Gleichungen (deren linke der kontrahierte Krümmungstensor ist) einen Energie-Impuls-Tensor, der, wie er sagt, „eine formale Zusammenfassung aller Dinge war, deren Erfassung im Sinne einer Feldtheorie noch problematisch war. Natürlich", fügt er hinzu, „war ich keinen Augenblick im Zweifel, daß diese Fassung nur ein Notbehelf war" [*18*]. Viele Versuche sind seither unternommen worden, zu einer einheitlichen Feldtheorie zu gelangen, insbesondere auch von EINSTEIN selbst. Ich glaube nicht, daß das Ziel erreicht ist, oder auch nur, daß wir dem Ziel in den letzten drei Dezennien wesentlich näher gekommen sind. Jede die Gravitation mitumfassende Feldtheorie, welche die Atome nicht als Femdkörper einführt, steht dem Rätsel der reinen Zahl 10^{40} gegenüber, des Verhältnisses von elektrischem und Gravitations Radius des Elektrons. Dennoch möchte ich mit einer kurzen Übersicht über diese Versuche mein Referat beschließen. Ich strebe keine Vollständigkeit an. Insbesondere soll die von EINSTEIN eine Zeitlang verfolgte, aber dann aufgegebene Idee des Fernparallelismus unberücksichtigt gelassen werden, weil sie fast einer Rückkehr zur SR gleichkommt. Im übrigen unterscheide ich drei Gruppen durch die Stichworte: Eichinvarianz, Affintheorie, Preisgabe der Symmetrie.

a) Eichinvarianz. Die mathematische Aufgabe, als welche MIE und HILBERT das Problem angriffen, war die Bestimmung aller Invarianten, die von den vier elektromagnetischen Potentialen φ_k und ihren ersten Ableitungen sowie von den 10 Gravitationspotentialen g_{ij} und deren ersten und zweiten Ableitungen abhängen. Unter ihnen, nahmen sie an, müsse sich die Wirkungsgröße befinden. Aber die Auswahl war groß; es galt, ein Prinzip zu finden, das darunter eine engere, womöglich eine eindeutige Wahl traf. Sprecher glaubte 1918 dies im Prinzip der Eichinvarianz gefunden zu haben [*19*]. Beim Herumfahren eines Vektors längs einer geschlossenen Kurve durch fortgesetzte infinitesimale Parallelverschiebung kehrt dieser im allgemeinen in einer andern Lage zurück; seine Richtung hat sich geändert. Warum nicht auch seine Länge? Dies war mein Einfall. Ich nahm also, an die Relativität der Länge glaubend, an, daß ein willkürliches Eichmaß zur Messung der Längen von Linienelementen lokal festgelegt werden muß, und daß wohl eine infinitesimale Übertragung desselben von Weltpunkt zu Weltpunkt statt hat, daß aber diese so wenig integrabel zu sein braucht wie die Parallelübertragung der Richtungen von Vektoren. Es zeigte sich dann, daß zur Beschreibung des metrischen Feldes neben dem Tensorfeld g_{ij} noch ein Vektorfeld φ_k nötig ist, daß aber Invarianz statt hat bei gleichzeitiger

Ersetzung der g_{ij} durch $e^{-\lambda} \cdot g_{ij}$ und der φ_k durch $\varphi_k + \frac{\partial \lambda}{\partial x_k}$, wo λ eine willkürliche Ortsfunktion in der Welt ist („Eichinvarianz"). Da man weiß, daß eine solche Willkür wie die durch die Substitution

$$\varphi_k \to \varphi_k + \frac{\partial \lambda}{\partial x_k} \tag{2}$$

ausgedrückte in den elektromagnetischen Potentialen steckt — eine Erfahrung, welche MIE und HILBERT beim Aufbau ihrer Theorie ausdrücklich verleugnet hatten, — schien es plausibel, diese φ_k mit den (in einer unbekannten kosmischen Einheit gemessenen) elektromagnetischen Potentialen zu identifizieren. In der Tat ergab das Wirkungsprinzip, das durch die Forderung der Eichinvarianz wenigstens nahezu eindeutig festgelegt ist, daß die φ_k diese Rolle spielen. Die resultierenden Gleichungen sind den EINSTEIN-MAXWELLschen Gleichungen genügend ähnlich, um das erkennen zu lassen, weichen aber doch genügend davon ab, um der Hoffnung Raum zu geben, daß sie singularitätenfreie statische kugelsymmetrische Lösungen gestatten. Die entgegenstehenden mathematischen Schwierigkeiten haben es freilich verunmöglicht, dies zu entscheiden; aber in keiner der noch zu erwähnenden konkurrierenden Theorien steht es damit besser, und darum sind sie alle physikalisch ohne Frucht geblieben. EINSTEIN machte sogleich den Einwand, daß mein Prinzip von der Nichtintegrabilität der Längenübertragung mit der absoluten Stabilität der Frequenzen von Spektrallinien in Widerspruch stehe. Die Definition des Maßfeldes im Äther mit Hilfe von wirklichen Maßstäben und Uhren kann natürlich nur als eine vorläufige Anknüpfung an die Erfahrung gelten. Erst wenn die physikalischen Wirkungsgesetze aufgestellt sind, muß man aus ihnen ableiten, in welcher Beziehung die an jenen Körpern abgelesenen Meßresultate zu den Fundamentalgrößen der Theorie stehen. Die Erfahrungen, auf die sich EINSTEIN mir gegenüber berief, zeigen gewiß, daß die physikalisch gemessenen Längen nicht der kongruenten Verpflanzung von Strecken folgen, die zum Fundament meiner Theorie gehört. Ich habe keine Lust, diese Theorie, an die ich längst nicht mehr glaube, zu verteidigen. Aber ich konnte damals doch mit Recht auf das Faktum hinweisen, daß sie im Krümmungsradius der Welt, sozusagen nachträglich, ein absolutes lokales Eichmaß liefert, auf das sich spektrale Frequenzen und andere Längengrößen einstellen können und vielleicht gemäß dem geltenden Wirkungsprinzip wirklich einstellen.

Heute, nach Einführung der SCHRÖDINGER-DIRACschen ψ_q durch die Quantentheorie, glaube ich, können wir mit großer Bestimmtheit den Finger auf den Punkt legen, in welchem meine Theorie irrte: die Eichinvarianz verbindet die elektromagnetischen Potentiale nicht mit den g_{ij} der Gravitation, sondern mit den ψ_q des Materiefeldes. Das konnte ich freilich 1918 nicht wissen! Damals waren diese ψ noch völlig unbekannt. Im Rahmen der AR wird der willkürliche Phasenfaktor $e^{-i\lambda}$, der den ψ anhaftet, von einer Konstanten zu einer willkürlichen Ortsfunktion in der Welt. Es muß dann notwendig dem Differentialoperator $\partial/\partial x_k$, um ihm eine invariante Bedeutung zu sichern, die allgemeinere Form $\frac{\partial}{\partial x_k} + i\varphi_k$ gegeben werden, wobei die φ_k ein Vektorfeld bilden: verwandelt man ψ_q in $e^{-i\lambda} \cdot \psi_q$, so geht φ_k in $\varphi_k + \frac{\partial \lambda}{\partial x_k}$ über. Genau diese Vorschrift ist es aber, nach welcher die DIRACsche Theorie die Einwirkung des elektromagnetischen Feldes auf das Elektron wiedergibt, wenn φ_k als das mit $\varepsilon/\hbar$ multiplizierte elektromagnetische Potential gedeutet wird. Hier sind wir nicht im Gebiet der Spekulation, sondern der Erfahrung, und die Einheit, in welcher die φ_k gemessen werden, ist nicht eine unbekannte kosmische, sondern eine bekannte atomare Größe. Man sollte freilich jetzt lieber von Phasen- statt von Eichinvarianz sprechen.

Die durch (2) zum Ausdruck kommende Unbestimmtheit in den elektromagnetischen Potentialen φ_k ist jedenfalls, auch wenn man die φ mit keinen anderen Größen verknüpft, eine gesicherte Tatsache, und die Invarianz gegenüber der Substitution (2) mit der willkürlichen Ortsfunktion λ ist auf die gleiche Weise mit dem Gesetz von der Erhaltung der Ladung verknüpft wie die Invarianz gegenüber Koordinatentransformation mit dem der Erhaltung von Energieimpuls. Dem Umstand, daß nicht die Potentiale φ_k, sondern nur die daraus abgeleiteten Feldgrößen

$$f_{ik} = \frac{\partial \varphi_k}{\partial x_i} - \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_k}$$

eine physikalische Bedeutung haben, kann man innerhalb des MIE-HILBERTschen Schemas Rechnung tragen und dadurch wenigstens eine gewisse Einschränkung in der Auswahl der zur Verfügung stehenden invarianten Wirkungsgrößen erzielen. So verfuhr BORN [*20*]. Statt der MAXWELLschen Wirkungsgröße L schlägt er insbesondere eine vor, welche unter Vernachlässigung der Gravitation so lautet:

$$\sqrt{1 + 2\beta L} - 1 \tag{3}$$

(β ist eine kleine Konstante). Damit errang er wenigstens einen partiellen Erfolg, insofern die statischen kugelsymmetrischen Lösungen seiner Gleichungen zwar nicht singularitätenfrei sind, aber doch zu einer endlichen Energie führen.

KALUZA hatte 1921 den Gedanken, ob sich nicht die Invarianz gegenüber der Substitution (2) als Erweiterung der Invarianz gegenüber Koordinatentransformation auf eine fiktive 5. Weltkoordinate x_0 deuten ließe [*21*]. Er machte die spezielle Annahme, daß die Koordinaten x_1, x_2, x_3, x_4 sich wie bei EINSTEIN nur untereinander transformieren, während für x_0 ein beliebiges Transformationsgesetz von der besonderen Form

$$x_0 \to x_0 + \lambda(x_1, x_2, x_3, x_4) \tag{4}$$

zugelassen wird. Setzt man dann eine quadratische Differentialform der fünf Variablen für die Beschreibung des metrischen Feldes an,

$$ds^2 = \sum_{\alpha,\beta} g_{\alpha\beta}\, dx_\alpha\, dx_\beta \quad (\alpha, \beta = 0, 1, 2, 3, 4),$$

so stellt sich heraus, daß g_{00} eine Invariante ist, die KALUZA durch $g_{00} = 1$ normiert (dies scheint zulässig, wenn man annimmt, daß nicht die Form ds^2 selber, sondern nur die Gleichung $ds^2 = 0$ eine physikalische

Bedeutung hat), während die vier Größen $\varphi_k = g_{k0}$ sich gegenüber Transformationen von x_1, x_2, x_3, x_4 so wie die Komponenten eines Vektors verhalten, bei der Transformation (4) aber die Substitution (2) erleiden. (Der Index k läuft hier immer nur von 1 bis 4.) Man macht die zusätzliche Annahme, daß alle $g_{\alpha\beta}$ von x_0 unabhängig sind. Man kommt so in der Tat auf natürliche Weise auf die MAXWELL-EINSTEINschen Feldgleichungen, und die Bewegung nicht nur von ungeladenen, sondern auch von geladenen Teilchen verläuft längs geodätischer Weltlinien. Dennoch liegt hier kaum mehr vor als eine formale Zusammenfassung der beiden Felder, die zu keinem Erkenntnisfortschritt führen kann, da sie dem von BORN korrigierten MIE-HILBERTschen Schema keinerlei Einschränkungen auferlegt. Eine ansprechende geometrische Einkleidung des Formalismus liefert die projektive Geometrie. Anstatt der vier Weltkoordinaten x_k benutzt der projektive Geometer die durch $x_k = X_k/X_0$ eingeführten fünf homogenen Koordinaten X_α. Ein Punkt bestimmt nur die Verhältnisse dieser Koordinaten; indem man diese selbst festlegt, erteilt man einem Punkt ein *Gewicht*. Setzt man $X_0 = e^{x_0}$, so bedeutet der Umstand, daß x_1, x_2, x_3, x_4 sich nur untereinander transformieren, dies, daß das Zusammenfallen von Punkten verschiedenen Gewichts eine invariante Bedeutung hat, während die Transformation (4) die Willkür des Gewichts ausdrückt. Neben KALUZA hat OSKAR KLEIN diese Ansätze verfolgt; er ist später, im Zusammenhang mit quantentheoretischen Erwägungen, dazu übergegangen, die Annahme, daß Zustandsgrößen und Transformationsfunktionen einschließlich λ von x_0 nicht abhängen, dahin zu verallgemeinern, daß sie periodische Funktionen von x_0 sind, mit einer durch die universellen Naturkonstanten vorgeschriebenen Periode [*22*]. Die angedeutete projektive Form wurde, von 1930 ab, ausgebaut von VAN DANTZIG und SCHOUTEN, ferner von PAULI. Sie war in einer etwas anderen Gestalt schon vorher von O. VEBLEN und B. HOFFMANN entwickelt worden. PAULI hat auch die Ausdehnung der Theorie auf die ψ-Größen verfolgt. EINSTEIN zusammen mit W. MAYER hat in den gleichen Jahren eine nahverwandte Theorie konstruiert, deren Formalismus gleichfalls fünf unabhängige Variable benutzt [*23*]. Aus jüngster Zeit wären Arbeiten von PASCUAL JORDAN zu erwähnen.

b) Reine und gemischte Affintheorien. EDDINGTON dehnte meine „suggestion", daß der Krümmungsradius der Welt das Eichmaß liefert, von der skalaren Krümmung auf den Krümmungstensor R_{ij} aus und wurde so dazu geführt, der Welt von Hause aus keine Metrik, sondern einen durch 40 Größen $\Gamma^i_{kl} = \Gamma^i_{lk}$ ausgedrückten affinen Zusammenhang zuzuschreiben. In der Tat entstehen die Krümmungsgrößen R_{ij} aus ihnen allein. EINSTEINs Gravitationsgleichungen im leeren Raum, $R_{ij} = 0$, hatten sich durch Hinzufügung des kosmologischen Gliedes in

$$R_{ij} = \Lambda \cdot g_{ij}$$

verwandelt; diese werden nun für EDDINGTON aus einem Naturgesetz zu einer *Definition* des metrischen Tensors g_{ij}. Diesen Gedanken aufgreifend, wies EINSTEIN alsbald darauf hin, daß dann die Gleichungen, welche die Komponenten Γ des affinen Zusammenhangs durch die g_{ij} ausdrücken, nicht länger als Definitionen aufgefaßt werden können, sondern aus einem Wirkungsprinzip abzuleitende Naturgesetze sein müssen. Und er fand in der Tat, daß sie sich ergeben, wenn man die einfachste Invariante, die im Rahmen der EDDINGTONschen Affintheorie möglich ist, als Wirkungsgröße wählt; das ist die Quadratwurzel aus der Determinante der R_{ij} [*24*]. Es treten dabei auch Terme auf, die sich als elektromagnetisches Potential deuten ließen, und die resultierenden Gleichungen sind einschließlich der kleinen kosmologischen Glieder mit ihren numerischen Koeffizienten genau mit den Feldgleichungen meiner metrischen Theorie identisch. Es ist mir schleierhaft, worauf diese merkwürdige Übereinstimmung beruht [*25*].

In dem Dilemma, ob man der Welt ursprünglich eine metrische oder eine affine Struktur zuschreiben soll, ist vielleicht der beste Standpunkt der neutrale, der sowohl die g wie die Γ als unabhängige Zustandsgrößen behandelt. Dann werden die beiden Sätze von Gleichungen, welche sie verbinden, zu Naturgesetzen, ohne daß die eine oder andere Hälfte als Definitionen eine bevorzugte Stellung bekommen. In der Tat zeigte EINSTEIN, daß ein Wirkungsprinzip von besonders simpler Bauart hier dieselben Gesetze liefert wie seine ursprüngliche rein-metrische Theorie [*26*]. Freilich führt dieser neutrale Standpunkt auch nicht über die rein-metrische Theorie hinaus, selbst nicht bei Einbeziehung des ψ-Feldes der Elektronen.

c) Preisgabe der Symmetrie. Ein beliebiger Tensor h_{ij} vom Range 2 spaltet in invarianter Weise in einen symmetrischen und einen schiefsymmetrischen Bestandteil:

$$h_{ij} = g_{ij} + f_{ij}; \qquad g_{ji} = g_{ij}, \qquad f_{ji} = -f_{ij}. \tag{5}$$

Diese kann man bzw. als Gravitationspotential und elektromagnetisches Feld deuten, die so zu einem einzigen Tensor h_{ij} zusammengefaßt erscheinen. Bei der Aufstellung seiner besonderen Wirkungsgröße des elektromagnetischen Feldes (3) war schon BORN von diesem Gedanken ausgegangen [*27*]. Systematisch haben dann EINSTEIN und SCHRÖDINGER untersucht, was geschieht, wenn man für die Γ^i_{kl} (wie auch für die g_{ij}) die Symmetrieannahme $\Gamma^i_{kl} = \Gamma^i_{lk}$ fallen läßt. SCHRÖDINGER stellt sich dabei auf den rein-affinen, EINSTEIN auf den neutralen metrisch-affinen Standpunkt [*28*]. SCHRÖDINGER glaubt durch seine Theorie zum mindesten eine Art von Mesonen mitzuumfassen, erwartet aber wohl, daß das ganze System von Feldgleichungen erst dem Quantisierungsprozeß unterworfen werden muß, ehe es die atomaren Erscheinungen zu erklären fähig ist. EINSTEIN nährt in seinem Busen noch immer die kühne Hoffnung, daß die Feldgleichungen selber ohne quantentheoretische Umdeutung dies leisten.

Ich gestehe, daß ich als Mathematiker mir von einer so formalen Verallgemeinerung wie dem Fallenlassen der Symmetriebedingungen nichts versprechen kann. Die Symmetrie der g_{ij} und der Γ^i_{kl} hat eine über das Formale weit hinausgehende Bedeutung, nämlich die, daß die *Natur* der Metrik und des affinen Zusammenhangs *eine* und allerorten die gleiche ist. Statt an der Symmetrie zu rütteln, sollte man nach einer andersartigen reicheren Struktur fahnden, deren Natur aber wiederum überall die gleiche sein müßte.

Wenn man der Mathematik eine für die Aufstellung physikalischer Theorien wichtige Lehre entnehmen kann, so ist es die, daß nur Größen, die unter ihrem spezifischen Transformationsgesetz *unzerlegbar* sind, eine einheitliche physikalische Entität darstellen; eine solche Größe ist der symmetrische und der schiefsymmetrische Tensor, g und f, aber nicht ihre Zusammenfassung (5). PAULI formuliert dieses Prinzip so: Was Gott getrennt hat, soll der Mensch nicht zusammenfügen. Durch die Preisgabe der Symmetrie ist die Mannigfaltigkeit der als Wirkungsgröße zur Verfügung stehenden Invarianten gewaltig gewachsen, während doch das Bestreben sein sollte, die Möglichkeiten einzuschränken. Offenbar sind wir doch nicht klug genug, um durch reines Denken — „aus dem hohlen Bauch", glaube ich, war früher der Ausdruck der Münchener Physiker dafür — die universelle Struktur der Welt und die sie beherrschenden Feldgesetze zu finden. Und ich glaube auch nicht, daß unser gegenwärtiges Wissen über die Wellenfelder der Elementarteilchen dafür irgend zureichend ist. Hier wie anderswo ist dafür gesorgt, daß unsere Bäume nicht in den Himmel (oder in die Hölle) wachsen.

Um aber nicht mit bloßer Kritik zu enden, will ich zum Schluß noch mein Scherflein zur Spekulation beitragen [29]. Die MAXWELLschen Gleichungen, in denen die Potentiale φ_k als die unabhängigen Zustandsgrößen figurieren, sind linear, und es besteht Invarianz gegenüber der Substitution (2). EINSTEINs Gravitationstheorie ergibt für die 10 Potentiale $\gamma_{ij} = \gamma_{ji}$ eines unendlich schwachen Gravitationsfeldes ebenfalls lineare Gleichungen, und diese sind invariant gegenüber der zu (2) analogen Substitution

$$\gamma_{ij} \to \gamma_{ij} + \left(\frac{\partial \xi_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \xi_j}{\partial x_i}\right)$$

mit vier willkürlichen Funktionen ξ_i; eine Invarianzeigenschaft, die die Koordinateninvarianz der strengen Gleichungen widerspiegelt. Vielleicht sollte man zunächst einmal auf diesem *linearen* Niveau nach einer Vereinigung von γ_{ij} und φ_k fahnden. Die Quantentheorie läßt die elektromagnetischen Potentiale φ_k als ein vom Prinzip der Phaseninvarianz gefordertes Anhängsel an die das Elektron darstellenden Feldgrößen ψ erscheinen. Frage: Sind die γ_{ij} in analogem Sinne ein Appendix an das Wellenfeld X eines unbekannten Elementarteilchens „Graviton"? Erst nachdem diese Frage beantwortet ist, sollte man jenen Übergang zur nichtlinearen Theorie versuchen, bei welchem die γ_{ij} sich in die wirklichen Zustandsgrößen g_{ij} des metrischen Feldes (zurück-)verwandeln; ein Prozeß, der dann notwendig auch die φ_k (samt den ψ und dem unbekannten X) mitergreifen würde und so in organischer Weise eine nichtlineare Theorie des MAXWELLschen Feldes ergäbe. Ich bin weit davon entfernt, dieses Programm durchführen zu können.

Literatur.

[1] Über die Entwicklung von EINSTEINs Ideen vgl. seine „Autobiographical Notes" in Albert Einstein Philosopher-Scientist, Bd. VII der Library of Living Philosophers, herausgeg. von PAUL A. SCHILPP. Evanston, Ill., 1949. (In der Folge zitiert als AE.) — [2] Enquiry concerning Human Understanding, Book II, Chap. 13, Sections 7—10. — [3] „Dialogo sopra i dui massimi sistemi del mondo", in Bd. VII, S. 198, der Opere, Edizione nazionale. Florenz 1890 bis 1909. Neudruck 1929—. — [4] Siehe z. B. S. 10—12 der englischen Ausgabe der Philosophiae naturalis principia mathematica von F. Cajori, Berkeley, Calif., 1934, zweiter Druck 1946; auch das den Definitionen I, II und IV folgende Scholium auf S. 6—7; betreffs der Beziehung zu NEWTONs Theologie: COTES' Vorrede zur 2. Aufl. der Principia, S. XXXII, (Cajori) und Principia, S. 546, (Cajori); ferner NEWTONs Optics, S. 370, (Ausgabe von E. T. Whittaker, London 1931) und der Briefwechsel zwischen Leibniz und S. Clarke in G. W. LEIBNIZ, Philosophische Schriften, Bd. VII, S. 352—440, (Ausgabe von Gerhardt). — [5] Principia, S. 419, Ausgabe von Cajori. — [6] BRUNOs Del infinito universo e mondi erschien 1584, die erste Aufl. von NEWTONs Principia 1687. — [7] Opere, ed. naz., Bd. VII, S. 212—214. — [8] Über die Entwicklung bis 1920 orientiert am besten der Artikel V 19: Relativitätstheorie von W. PAULI, in der Enzyklopädie der mathematischen Wissenschaften, Bd. V, Teil 2, S. 539—775, 1904—1922 (zitiert als „Pauli, Enc."). — [9] Ich entnehme diese Zahlangaben dem schönen Artikel von MAX VON LAUE über Inertia and Energy, AE, S. 503—533. Andere frühe Hinweise auf kernphysikalische Anwendungen siehe bei PAULI, Enz., S. 681. — [10] Die grundlegenden Arbeiten von HEISENBERG und von ihm, BORN und JORDAN erschienen in der Z. Physik **33**—**35** (1925/26); die von E. SCHRÖDINGER sind zusammengefaßt in den Abhandlungen zur Wellenmechanik. Leipzig 1927. — [11] Proc. Roy. Soc. Lond. A **117**, 610; **118**, 351 (1928). — [12] Siehe AE, S. 52. — [13] Siehe die genaue Diskussion in dem Vortrag über Relativity Effects in Planetary Motion, den G. M. CLEMENCE im Rahmen des Princetoner Symposium aus Anlaß von EINSTEINs siebzigstem Geburtstag, hielt: Proc. Amer. Philos. Soc. **93**, 532—534 (1949). — [14] Siehe für MILNE: AE, S. 415—435; für BIRKHOFF: Proc. Nat. Acad. Sci. USA **29**, 231 (1943) und die Bemerkungen von H. WEYL über mögliche lineare Theorien der Gravitation in Amer. J. Math. **66**, 591—604 (1944). — [15] EINSTEIN: Sitzgsber. preuss. Akad. Wiss., Math.-naturwiss. Kl. **1918**, 448. — [16] WEYL, H.: Raum, Zeit, Materie, 5. Aufl. Berlin 1923, § 38. Mit viel größerer Sorgfalt, auch zur Bestimmung der Wechselwirkung mehrerer Teilchen, wurde dieser Weg dann in mehreren Arbeiten von EINSTEIN und INFELD beschritten; vgl. die letzte abschließende Arbeit, die im Canadian J. Math. **1**, 209—241 (1949) erschien. — [17] MIE, G.: Ann. Physik **37**, **39**, **40** (1912/13). — HILBERT, D.: Die Grundlagen der Physik. Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, Math.-physik. Kl. **1915** u. **1917**. — [18] AE, S. 74. — [19] Vgl. die Darstellung in Raum, Zeit, Materie, 5. Aufl., S. 298—308. — [20] BORN, M.: Proc. Roy. Soc., Lond. A **143**, 410 (1934). — SCHRÖDINGER, E.: Proc. Roy. Soc., Lond. A **150**, 465 (1935). — [21] KALUZA: Sitzgsber. preuss. Akad. Wiss., Physik.-math. Kl. **1921**, 966. — [22] KLEIN, O.: Z. Physik **37**, 895 (1926); **46**, 188 (1927). — Vgl. ferner: O. KLEIN, Ark. Mat., Astronom. Fysik, Ser. A **34**, Nr 1 (1946). Weitere Publikationen stehen in Aussicht. — [23] SCHOUTEN u. VAN DANTZIG: Proc. Amsterdam **34**, 1398 (1931). — Z. Physik **78**, 639 (1932). — DANTZIG, VAN: Math. Ann. **106**, 400 (1932). — PAULI, W.: Ann. Physik (5) **18**, 305—372 (1933). — VEBLEN, O., u. B. HOFFMANN: Projective relativity. Physic. Rev. **36**, 810—822 (1930). — VEBLEN, O.: Projektive Relativitätstheorie, Ergebnisse der Mathematik, Bd. II/1. Berlin 1933. — EINSTEIN, A., u. W. MAYER: Sitzgsber. preuss. Akad. Wiss., Math.-naturwiss. Kl. **1931**, 541—557; **1932**, 130—137. — [24] EINSTEIN: Sitzgsber. preuss. Akad. Wiss., Math.-naturwiss. Kl. **1923**, 32, 76, 137. — EDDINGTON, A. S.: Mathematical Theory of Relativity, 2. Aufl., Note 14. — [25] Vgl. zu allen diesen Ausführungen H. WEYL, Geometrie und Physik. Naturwiss. **19**, 49—58 (1931). — [26] EINSTEIN, A.: Sitzgsber. preuss. Akad. Wiss., Math.-naturwiss. Kl. **1925**, 414. — WEYL, H.: Physic. Rev. **77**, 699—701 (1950). — [27] BORN, M.: Proc. Roy. Soc., Lond. A **144**, 425—451 (1934). — [28] Von SCHRÖDINGER zitiere ich die drei Arbeiten betitelt „The final affine Field Laws" in Proc. Roy. Irish Acad. A **51**, 163—171, 205—216; **52**, 1—9 (1947/48); voraufgehende Arbeiten sind dort angeführt. Besonders nützlich ist die Übersicht der verschiedenen Theorien in der 2. Abh. EINSTEINs letzte Version seiner Theorie findet man im Appendix II von The Meaning of Relativity, 3. Aufl., S. 109—147. Princeton, N. J. 1949. Vorbereitet war sie durch die Arbeiten von EINSTEIN und STRAUS in Amer. J. Math. **46**, 578 (1945) und **47**, 731 (1946). Nach Abschluß dieses Artikels erschien E. SCHRÖDINGERS Buch Space-Time Structure. Cambridge 1950. — [29] WEYL, H.: Amer. J. Math. **66**, 602 (1944).

Institute for Advanced Study Princeton, N. J.

Eingegangen am 8. November 1950.

Theorie und Erfahrung in der Kosmologie *).

Von O. HECKMANN, Hamburg-Bergedorf.

Vor etwa einem Jahr wurde auf dem Mt. Palomar in Californien das größte Fernrohr der Welt eingeweiht, ein riesiges neues Spiegelteleskop; es steht im wolkenlosesten und staubfreiesten Klima der Vereinigten Staaten, hat viele Millionen Dollar gekostet und erreichte nach großen anfänglichen Schwierigkeiten dank der verwendeten Sorgfalt und Mühe eine bisher nicht gekannte optische Vollkommenheit.

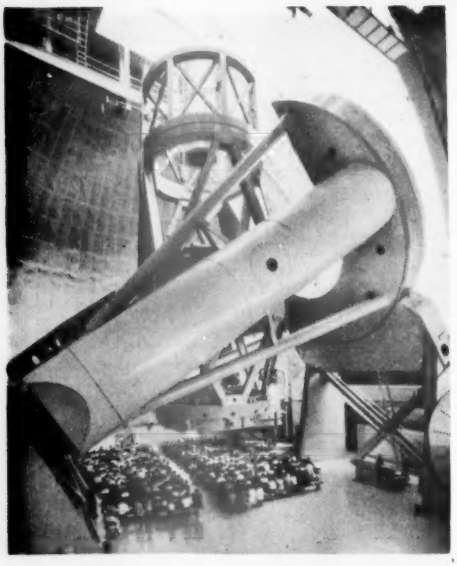

Abb. 1. Der 5 m-Spiegel von Mt. Palomar während der Einweihungsfeier.

Nun wird es eingesetzt zur Untersuchung von Fragen, die mit anderen Instrumenten zwar angefaßt, nicht aber entschieden werden konnten.

Unter den ihm gestellten Aufgaben ist auch die der Prüfung moderner kosmologischer Theorien; das sind Lehren vom Aufbau und Verhalten der Welt als einem Ganzen im astronomischen Sinne.

Natürlich hatten viele Zeitalter und Völker eine mehr oder weniger bestimmte Vorstellung vom Ganzen der Welt, und das Studium der Entwicklung dieser Vorstellungen im europäischen Kulturkreis liefert tiefe Einblicke in die abendländische Geistesgeschichte. Ein eigentlich *naturwissenschaftliches* Problem konnte sich aber erst langsam aus dem Bereich vager Spekulation lösen, als man begann, die NEWTONsche Mechanik anzuwenden auf die der Aufklärungszeit so wichtige Vorstellung von der unendlichen Erstreckung des Weltalls in Raum und Zeit.

So finden wir bei NEWTONs Schüler HALLEY die Bemerkung, die Welt *müsse* bis ins Unendliche mit Materie erfüllt sein, weil sie sonst nicht im Gleichgewicht verharren, sondern nur zusammenstürzen könne.

In der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts kam man *umgekehrt* zu der Überlegung, daß die Kraftwirkung unendlich weiter Massen im unendlich ausgedehnten, gleichförmig mit Materie erfüllten Raum zu katastrophalen Unbestimmtheiten führen müsse. Wenn man nämlich das NEWTONsche Gravitationsgesetz als gültig über beliebige Entfernungen ansah, so ergab sich, daß zwar die Kraftwirkung einer bestimmten Masse mit immer größerer Entfernung quadratisch abnimmt, daß jedoch wegen der mit dem Kubus der Entfernung zunehmenden Volumina die Gesamtkraft ferner Massen der Entfernung proportional wächst.

Wie also konnte man hoffen, daß die aus allen Richtungen auf ein beschränktes Gebiet wirkenden unendlichen Kräfte unendlich ferner Massen sich gerade aufheben? Man empfand die Schwierigkeiten so stark, daß man radikale Abänderungen des NEWTONschen Gesetzes für große Entfernungen erwog.

Als EINSTEIN 1916 mit seiner Allgemeinen Relativitätstheorie das analoge Problem angriff, traf er zunächst auf die gleichen Schwierigkeiten. Auch er sah sich veranlaßt, die Grundgesetze seiner Theorie abzuändern; zwar so, daß sie sich seinen Leitgedanken noch fügten, aber ebenfalls das Gravitationsgesetz für große Entfernungen modifizierten. Da in seiner Theorie die Massenverteilung weitgehend die Raumstruktur bestimmt, so wurde es möglich, sich den gleichförmig mit Materie erfüllten Raum endlich und doch unbegrenzt zu denken.

Von da an begann die Kosmologie, die bisher nur am Rande des Interesses gestanden hatte, eine rasche Entwicklung, die sie bald zu einem besonderen und ausgebreiteten Zweig der astronomischen Theorie werden ließ. Seine Fruchtbarkeit bewies er durch die Anregung systematischer und weittragender Beobachtungen, deren Bedeutung und Ergebnis noch über den kosmologischen Anlaß hinausführte.

Dieser Vortrag nun soll sich in zwei große Abschnitte teilen: Im ersten sollen Theorie und Beobachtung geschildert werden, wie sie sich etwa zu Beginn des letzten Krieges gegenüberstanden. Damals war ein gewisser Abschluß erreicht, dem eine Periode minderer Produktivität folgte. Inzwischen aber beginnen neue Gedanken zu wachsen.

Ein zweiter Abschnitt also soll zu schildern versuchen, welche Neuentwicklungen der Theorie inzwischen aufgetreten sind und welche Erwartungen an neue instrumentelle Hilfsmittel wie den 5 m-Spiegel von Mt. Palomar geknüpft werden.

I A. Weltmodelle [*1*].

Eine astronomische Theorie des Weltganzen kommt nicht ohne Spekulationen aus. Doch werden wir wünschen, diese so stark wie möglich zurückzudrängen und da, wo sie unvermeidbar werden, in ein möglichst exaktes, also mathematisiertes System zu bringen, damit stets genau feststeht, welche Voraussetzungen für bestimmte Resultate verantwortlich sind.

Zunächst schlage ich vor, und ich nehme an, Sie werden mir darin folgen, so weit wie möglich Begriffe und Naturgesetze zu verwenden, die sich im endlichen Bereich menschlicher Erfahrung bewährt haben. Aber sofort haben wir zu bedenken, daß die eventuelle Übertragung dieser Gesetze auf beliebig große Räume nicht ohne Willkür geschehen kann. Denn wir wissen zwar,

*) Vortrag, gehalten auf der Tagung der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte am 24. Oktober 1950 in München.

mit welcher erstaunlichen Genauigkeit z.B. das NEWTONsche Gravitationsgesetz die Bewegung in unserem kleinen Sonnensystem darstellt; ob aber in Räumen von tausend-, ja millionenfacher Ausdehnung die Anziehungskraft nicht wesentlich rascher abnimmt als mit dem Quadrat der Entfernung, ob nicht z.B. etwas wie eine Absorption der Gravitationskraft eintritt, weiß niemand. Also hat die Ausdehnung des Gravitationsgesetzes auf beliebige Fernen keine Stütze in der Erfahrung.

Darauf beruht es, daß es verschiedene moderne Kosmologien gibt. Man hat begonnen, sog. *Weltmodelle* zu entwerfen oder zu bauen. Diese unterscheiden sich entweder in den verwendeten *Rahmengesetzen* — je nachdem, ob sie die Mechanik in ihrer klassischen Form nach NEWTON verwenden oder ob sie irgendeine Modifikation wie die EINSTEINsche Theorie zugrunde legen — oder in der Anordnung der den Rahmengesetzen unterworfenen Materie. Wir wollen aus der großen Fülle der möglichen nur zwei besonders wichtige Modelle herausgreifen. Besonders das erste wird die vorhin angestellten sehr allgemeinen Betrachtungen deutlich machen; das zweite jedoch ist physikalisch wesentlich ernster zu nehmen.

Wir wollen für das *erste Modell* zunächst die Verabredung treffen, daß sowohl die Grundregeln der NEWTONschen Mechanik — d.h. der Satz von der Erhaltung der Masse und der Satz von der Erhaltung des Impulses — streng gelten sollen, wie auch, daß das NEWTONsche Gravitationsgesetz exakt erfüllt sei. *Erhaltung der Masse* soll heißen, daß keine Massen aus dem Nichts entstehen oder ins Nichts vergehen sollen. *Erhaltung des Impulses* ist ein anderer Ausdruck für das Trägheitsgesetz und wird oft in die allzu spezielle Form gekleidet: „Kraft ist Masse mal Beschleunigung". Damit haben wir die Rahmengesetze fixiert.

Ferner aber wollen wir die Anordnung der Materie so gleichförmig wie möglich wählen, derart, daß für irgendwelche beliebig in der Welt verteilten Beobachter in einem bestimmten Zeitpunkt sowohl überall gleiche Dichte der Materie als auch gleiche Bewegungsverhältnisse herrschen sollen. Diese letztere Forderung nennen wir das *Homogeneitätspostulat*. Es wird verdeutlicht durch folgende Abb. 2.

Die Pfeile sollen die Bewegungen darstellen, welche ein in der Mitte des Bildes stehender Beobachter wahrnimmt. Sie sind radial von ihm fortgerichtet und wachsen proportional zur Entfernung an. Es sieht zunächst so aus, als sei die Mitte in besonderer Weise ausgezeichnet. Aber das ist eine Täuschung. Ein zweiter Beobachter nämlich, der durch den links oben stehenden Kreis herausgehoben ist, beobachtet in seiner Umgebung ein genau gleiches Bild: Von allen ausgezogenen Pfeilen des Bildes denke man sich den Pfeil beim zweiten Kreis abgezogen. Dann bleiben die gestrichelten Pfeile übrig, welche das Bewegungsbild darstellen, wie es dem zweiten Beobachter erscheint. Der in der Figur wiedergegebene Bewegungstyp einer reinen Expansion hat also die verlangte Eigenschaft, von jedem Standpunkt aus, sofern dieser nur relativ zu seiner Umgebung ruht, wo auch immer man ihn wählen mag, den gleichen Anblick zu bieten. Jeder Beobachter möchte wohl glauben, er sei die Mitte der Welt; aber bei einigem Nachdenken sieht er ein, daß diese Behauptung von jedem anderen auch aufgestellt werden kann, daß dieses Weltmodell also gerade so gebaut ist, daß es überall und nirgends eine Mitte hat: Es ist vollkommen homogen.

Kombiniert man nun die mathematischen Formulierungen dieser Homogeneität mit den vorhin angeführten Rahmengesetzen der klassischen Mechanik, so ergibt sich als eindeutige Folgerung, daß diese Welt nicht in Ruhe verharren kann. Man hätte vielleicht vermuten können, daß bei der geforderten Homogeneität alle Kräfte einander an jeder Stelle das Gleichgewicht halten. Es ergibt sich jedoch zwingend, daß zwischen irgend zwei beliebig weit voneinander entfernten Raumgebieten als Resultante aller Gravitationskräfte des Weltalls eine Anziehung herrscht, die mit der Entfernung wächst.

Die Folge ist ein sehr einfacher Typus einer großräumigen kosmischen Bewegung, nämlich eine allgemeine Expansion oder Kontraktion. Jedoch sind drei

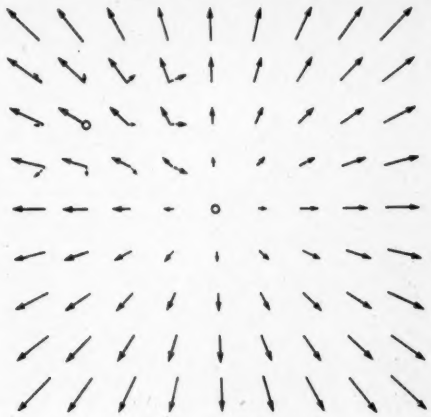

Abb. 2. Homogene Expansion.

Unterfälle zu unterscheiden: Ist nämlich *erstens* die gesamte Bewegungsenergie im Einheitsvolumen, oder, wie man auch sagt, die Dichte der kinetischen Energie größer als die Dichte der Gravitationsenergie, so hört eine einmal begonnene Ausdehnung nie auf; die Weltmaterie verdünnt sich immer mehr mit schließlich konstanter Geschwindigkeit, „die Welt platzt". — Ist aber *zweitens* die Energiedichte der Bewegung gleich der Dichte der Gravitationsenergie, so hört eine einmal begonnene Ausdehnung zwar in endlicher Zeit nie auf, sie wird aber schwächer und schwächer und kommt n unendlich ferner Zukunft zum Stillstand. — Überwiegt jedoch *drittens* die Gravitationsenergie, so kehrt sich eine anfängliche Expansion nach endlicher Zeit um, sie wird zur Kontraktion, die mit wachsender Geschwindigkeit erfolgt, bis die Welt zusammenstürzt.

Damit sind die für uns wesentlichen Eigenschaften des ersten Modells erschöpft. Wir fassen sie zusammen: Ist der gesamte euklidische Raum gleichförmig mit Materie erfüllt und führt diese Materie nur völlig homogene Bewegungen aus, bei welchen auch keine Richtung ausgezeichnet ist, so ist bei Annahme der Rahmengesetze der NEWTONschen Mechanik kein Zustand der Ruhe möglich; sondern es müssen *großräumige* Expansionen oder auch Kontraktionen auftreten.

Wir betrachten nun das *zweite Modell*. Es ist *eines* und zwar das wichtigste unter den vielen, die uns die EINSTEINsche Relativitätstheorie liefert. Diese Theorie

kann als eine moderne Verfeinerung der NEWTONschen Gravitationstheorie aufgefaßt werden. Da sie Masse und Energie als zwei verschiedene Formen derselben Sache ansieht, so unterliegt in ihr Energie *jeder* Art der Schwere. Auch jeder Energie- und Impulsstrom hat einen Einfluß auf das Schwerefeld, dessen Wirkungen sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten.

Diese Verfeinerungen der Theorie sind erkauft durch Verwendung von wesentlich komplizierteren mathematischen Begriffsbildungen. Aber dadurch, daß EINSTEIN die stillschweigende Annahme der klassischen Physik, der Raum sei euklidisch oder habe überhaupt eine a priori angebbare Metrik, fallen ließ, war es ihm möglich, die Schwerkraft nicht mehr als in den Raum eingebettetes Kraftfeld zu betrachten,

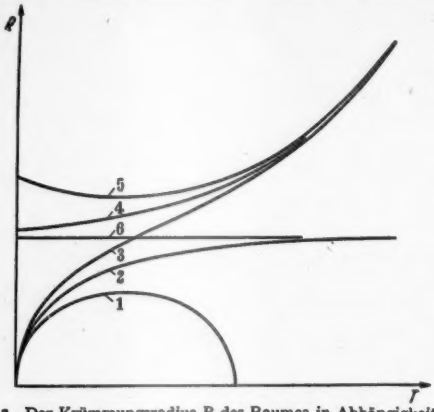

Abb. 3. Der Krümmungsradius R des Raumes in Abhängigkeit von der Zeit T für verschiedene Modelle.

sondern als Ausfluß der Raumstruktur selbst, als Folge der nichteuklidischen Weltgeometrie.

Auch im Rahmen der EINSTEINschen Theorie könnten wir unendlich ausgedehnte Weltmodelle erörtern. Doch sind wir dazu keineswegs gezwungen, haben vielmehr die willkommene Möglichkeit, die durch das Unendlichkeitsproblem entstehenden Schwierigkeiten auszuschalten. Denn wir dürfen uns den Raum ohne alle Unendlichkeit denken. Das heißt nicht, daß er irgendwo aufhört. Er hat Länge, Breite, Höhe an jeder Stelle. Aber geht man in irgendeiner Richtung geradeaus, so kommt man nach Durchlaufung des Weltumfangs zurück zum Ausgangspunkt. Es ist dem Mathematiker begrifflich (wenn auch kaum anschaulich) leicht, solche Raumtypen mit drei und mehr Dimensionen zu ersinnen, für die die Kugeloberfläche ein zweidimensionales Beispiel ist.

Solche Räume von endlicher Unbegrenztheit befreien uns auf eine sehr radikale Weise von allen Schwierigkeiten des Unendlichen. Reduziert man das Problem auf seine mathematische Endform, so zeigt sich, daß in dieser Welt wieder homogen verteilte Materie existieren kann; wieder sind irgend zwei verschiedene ihrer Punkte einander äquivalent. Und wie eine Seifenblase sich ausdehnen kann, so, daß irgend zwei ihrer Punkte sich voneinander entfernen mit einer Geschwindigkeit, die ihrer (krummen!) Entfernung proportional ist, so ist auch in der sphärischen Welt eine allgemeine homogene Expansion möglich, deren zeitlicher Ablauf von der Theorie vorhergesagt wird. — Zwischen diesem zweiten Modell und dem ersten gibt es tiefe Entsprechungen, die wir aber hier nicht weiter verfolgen können.

Doch sind wir verpflichtet, die kleine Abänderung der EINSTEINschen Theorie zu erwähnen, von der wir in der Einleitung sprachen. Sie ist einer ganz bestimmten Abänderung des NEWTONschen Gesetzes äquivalent. Doch wäre sie im klassischen Rahmen von hoher Willkür, während sie im Rahmen der Relativitätstheorie natürlich ist. Diese Abänderung, das sog. Λ-Glied, führt uns endgültig zu den Weltmodellen, deren zeitlichen Ablauf wir im Bilde vorführen wollen, weil sie für die Konfrontierung mit den Beobachtungen (von welchen wir gleich sprechen werden) die wichtigsten sind.

Abb. 3 zeigt den Radius R der Welt in Abhängigkeit von der Zeit T. Der *Fall 1 heißt:* Anfänglich rasche Ausdehnung, Umkehr nach einer gewissen Zeit und endlich Zusammensturz. *Fall 2 heißt:* Expansion mit abnehmender Geschwindigkeit, allmählicher Übergang in statische Verhältnisse. *Fall 3 heißt:* Andauernde Expansion mit zeitweiliger Verzögerung und schließlich schneller und völliger Verdünnung. *Fall 4 heißt:* Ganz allmählicher Übergang aus der Ruhe vor unendlich langer Zeit in die Expansion und schließlich wieder völlige Verdünnung. *Fall 5 heißt:* Kontraktion aus der unendlichen Vergangenheit auf eine Minimalgröße der Welt mit nachfolgender unendlicher Expansion. Schließlich *bedeutet Fall 6* eine konstante ruhende Welt ohne Expansion oder Kontraktion. Das Modell 6 fand EINSTEIN 1917. Wir wissen heute von ihm, daß es ganz instabil ist und eine unvermeidliche Neigung besitzt, in Expansion oder Kontraktion überzugehen.

Alle Modelle im Rahmen der *Relativitätstheorie*, also auch die eben vorgetragenen, haben den Vorzug, daß man die Vorgänge der Lichtfortpflanzung besonders gut in ihnen behandeln kann, während die klassischen Modelle nur höchst gekünstelt mit optischen Vorgängen verbunden werden können. Deshalb haben die relativistischen Modelle eine besondere Bedeutung, und sie verdienen unbedingt den Vorzug, wenn es gilt, die Theorie mit der Beobachtung zu konfrontieren.

Jedenfalls können wir eine klare Feststellung treffen: Bei homogener Materie- und Bewegungsverteilung führen die beiden konservativsten und erprobtesten Theorien der Mechanik und der Schwerkraft, die NEWTONsche und die EINSTEINsche, auf Modelle mit allgemeinen Expansions- oder Kontraktionsphänomenen, während Ruhe ein gefährlich instabiler Zustand ist.

Im ganzen darf man es also für lohnend halten, in der *Wirklichkeit* nach weiträumigen Bewegungen, etwa nach Expansionen oder Kontraktionen zu suchen in Gebieten, die so groß sind, daß in ihnen die Materie einigermaßen homogen verteilt ist.

In der Tat wußte man vor 30 Jahren von den möglichen Weltmodellen sehr viel weniger, als wir eben zusammengestellt haben, und begann doch, mit den großen Hilfsmitteln der amerikanischen Sternwarten zu suchen nach jenem kosmischen Bewegungstypus, für den die Theorie damals erst spärliche Anzeichen bot.

IB. Beobachtungen [2].

1. Verteilung außergalaktischer Nebel.

Es gibt verschiedene Gestirne, die man Nebel nennt. Auf der einen Seite stehen die wirklichen Nebel fein verteilter Materie. Hier meinen wir aber jene

fernen Systeme, die in Wirklichkeit aus vielen Einzelsternen bestehen, oft Spiralstruktur zeigen, oft aber elliptisch, kugelig und manchmal auch unregelmäßig aussehen. In rascher Folge zeigen unsere Abbildungen einige Typen.

Die Nebel sind im Weltall etwas überaus gewöhnliches. Moderne Instrumente können leicht Millionen

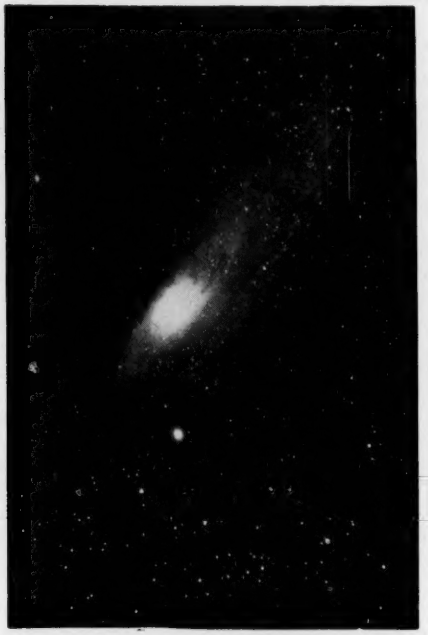

Abb. 4. Der Andromeda-Nebel.

von ihnen photographieren. Nur von den helleren Nebeln konnte man Verzeichnisse anlegen; die schwächeren und schwächsten sind so zahlreich, daß man zu ihrem Studium sich mit gleichmäßig über den Himmel verteilten Stichproben begnügen muß. Dabei entdeckte man eine merkwürdige Anordnung der Nebel an der Sphäre: Sie meiden streng die Zone der Milchstraße, tauchen aber in geringer Zahl an ihrem Rande auf und werden um so häufiger, je weiter man sich von der Milchstraße entfernt. In hinreichender Entfernung von der Milchstraße ist die Verteilung der Nebel an der Himmelssphäre im großen und ganzen gleichförmig. Die Meidung der Milchstraße selbst erklärt den Namen „außergalaktisch", weil das griechische „Galaxias" zu deutsch „Milchstraße" heißt.

Wir wissen heute, daß jeder dieser Nebel ein Sternsystem wie die Milchstraße ist; aus großer Entfernung betrachtet würde die Milchstraße selbst wie einer der außergalaktischen Nebel, vermutlich wie ein Spiralnebel, aussehen. Der ungefähre Durchmesser der Nebel beträgt einige tausend und sogar in Einzelfällen 50 bis 100000 Lichtjahre. Doch ist der Abstand irgend zweier benachbarter Nebel rund eine Million Lichtjahre.

Wir wissen aber auch, daß die vorhin erwähnte Meidung der Milchstraße durch die Nebel nur eine scheinbare ist, weil nahe der Symmetrieebene der Milchstraße lichtabsorbierende Materie gehäuft liegt, die uns in der Richtung ihrer weitesten Erstreckung den Ausblick in den Weltraum außerhalb der Milchstraße verwehrt, so wie sie einem außerhalb stehenden Beobachter den Einblick in die Tiefen unseres eigenen Systems wehren würde, wenn er unserem System auf die Kante sieht. Einige Bilder machen Ihnen diese mit den individuellen Nebeln verbundene Absorption deutlich.

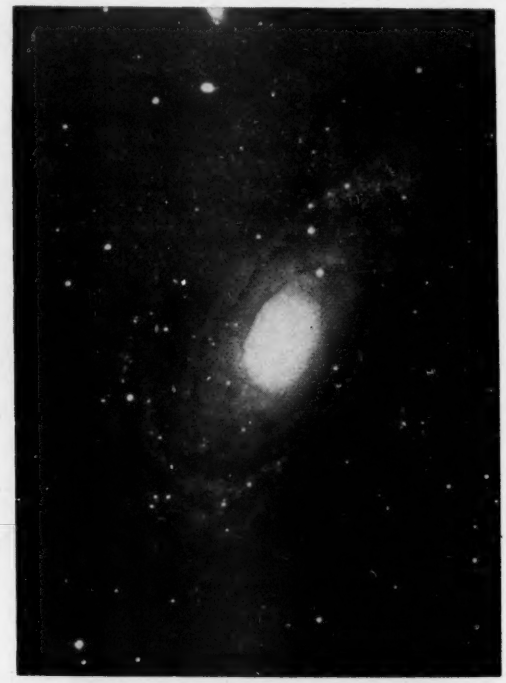

Abb. 5. Der Spiralnebel M 81 im Großen Bären.

So zeigen die gleichmäßig über den ganzen erforschbaren Raum verteilten Nebel nichts Absonderliches. Ihre Anordnung ist im großen und ganzen

Abb. 6. Der Nebelhaufen im Haar der Berenike.

von einer gewaltigen Monotonie bis zur Grenze der Leistungsfähigkeit unserer Instrumente, d. h. bis zu Entfernungen jenseits von 500 Millionen Lichtjahren.

2. *Bewegung der außergalaktischen Nebel.*

Etwa gleichzeitig mit unserer Kenntnis der Nebelentfernungen vermehrte sich die Kenntnis ihrer Bewegungen. Zwar war es unmöglich, Ortsveränderungen der Nebel an der Sphäre zu beobachten; doch erlaubte das DOPPLERsche Prinzip die Messung der Nebelgeschwindigkeiten im Visionsradius, also auf uns zu oder von uns weg. Nähert sich nämlich eine Lichtquelle dem Beobachter mit einer bestimmten Geschwindigkeit, so verschieben sich alle FRAUNHOFERschen Linien ihres Spektrums um einen bestimmten Betrag zu seinem violetten Ende; entfernt sich jedoch die Lichtquelle, so verschieben sich die Linien zum roten Ende des Spektrums. Immer ist der Betrag der Linienverschiebung der Radialgeschwindigkeit proportional.

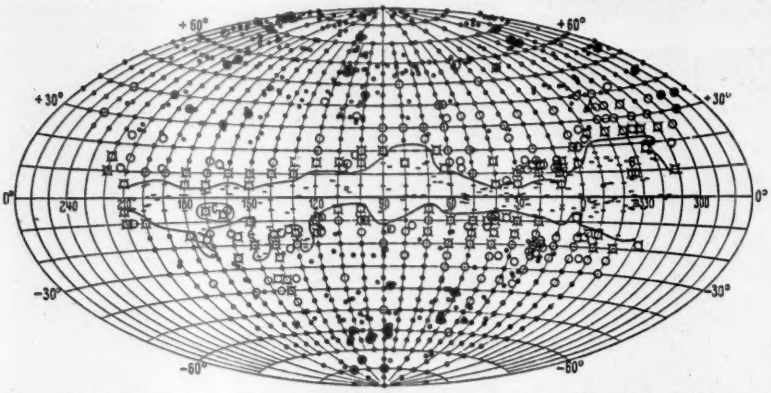

Abb. 7. Die Verteilung der Nebel am Himmel (HUBBLE). Die Milchstraße zieht sich von links nach rechts, ihr Nordpol ist oben. Kleine Punkte bedeuten normale Nebelzahlen, große Punkte bzw. offene Kreise bedeuten über- bzw. unternormale Anzahlen, Striche bedeuten Felder ohne Nebel.

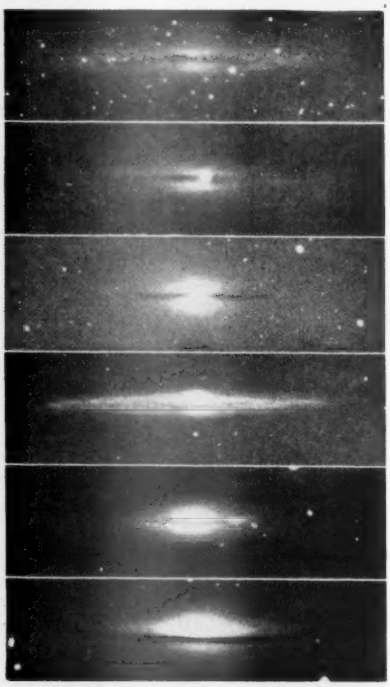

Abb. 8. Von der Kante gesehene Nebel mit Absorptionszone.

Schon früh fiel auf, daß man bei den Nebeln nur ganz selten Violettverschiebungen fand und zwar nur bei ganz nahen Nebeln, daß vielmehr die Rotverschiebungen die überwältigende Mehrheit bildeten. Als sich das Material stetig vermehrte, erkannte man, daß die Nebel größerer Rotverschiebung auch die weiter entfernten sind, daß eine strenge Korrelation zwischen Rotverschiebung und Entfernung besteht. Je mächtiger die optischen Hilfsmittel waren, mit denen man zu stets schwächeren und damit weiteren Nebeln vordrang, um so mehr wuchsen die Rotverschiebungen an. Das bisher publizierte Material enthält Radialgeschwindigkeiten bis zu 40000 km/sec. Trägt man in ein Diagramm die Radialgeschwindigkeiten gegen die Entfernungen auf, so erhält man eine gut verbürgte Proportionalität zwischen beiden. Jedesmal, wenn man um 100 Millionen Lichtjahre weiter nach außen geht, wächst die Radialgeschwindigkeit um rund 15000 km/sec.

Das Bild der Nebelflucht ist, soweit wir sehen, völlig universell. Wir erinnern uns an unser erstes Modell und hüten uns davor zu glauben, wir seien die Mitte, von der alles wegeilt. Vielmehr garantiert uns die Proportionalität von Radialgeschwindigkeit und Entfernung, daß jeder Nebel mit dem gleichen Recht sich als Mitte jener Welt ansehen darf, die da auseinanderfliegt.

Die Modellbetrachtungen hatten die noch ganz unbestimmte Erwartung geweckt, man könne eine ganz allgemeine kosmische Expansion oder Kontraktion entdecken, wenn man nur zu hinreichend weiten Entfernungen vorstoße. Und die Suche blieb nicht erfolglos: es gibt die allgemeine Expansion wirklich.

Rein *qualitativ* also können wir sagen, daß der seltsame Befund einer expandierenden Welt ohne Schwierigkeiten verstanden werden kann auf Grund allgemein geläufiger dynamischer Theorien, unter welchen sich die EINSTEINsche besonders empfiehlt durch die Leichtigkeit und Eindeutigkeit, mit der sie auch die in unser Problem hineinspielenden optischen Fragen beantwortet.

II. Moderne Entwicklungen.

Wie aber steht es mit einer *quantitativen* Prüfung der Theorie? Bevor wir davon sprechen, müssen wir auf zwei weitere Problemkreise wenigstens andeutend eingehen, die für eine Prüfung unserer Theorie in Betracht gezogen werden müssen.

Wir sahen in Abb. 3, die den Zeitablauf der verschiedenen endlich-unbegrenzten Modelle im Rahmen der EINSTEINschen Theorie wiedergab, daß eine Reihe von Kurven, nämlich die Nr. 1, 2 und 3, mit dem Weltradius $R = 0$ zur Zeit $T = 0$ beginnen, daß also vor

einer gewissen endlichen Zeit der Raum ein sehr kleines (formal streng ein verschwindendes) Volumen gehabt haben muß, das natürlich von einer extrem hohen (formal unendlich hohen) Dichte der Materie begleitet gewesen sein muß. *Wenn* ein solches Modell in der Natur auch nur angenähert verwirklicht wäre, so müßte man von einem *Weltanfang* zu jenem singulären Zeitpunkt sprechen, weil damals die Materie in Zuständen höchster Dichte, höchster Temperatur und höchsten Druckes keine Möglichkeit zur Existenz jener vielfältigen individuellen Formen bot, die wir in der Natur kennen.

Unter diesen Formen sind nicht allein die dem Astronomen vertrauten der Nebel und Sterne, sondern die dem Physiker so wichtigen der Atome, insbesondere der aus Protonen und Neutronen aufgebauten Atomkerne. Das für uns Merkwürdige ist, daß nach dem heutigen Stande unseres Wissens die relative Häufigkeit der chemischen Elemente überall im Weltall nahezu gleich ist. Kleine Unterschiede haben sich bisher durch besondere lokale Bedingungen verständlich machen lassen. Aber konnte die heute beobachtete universelle Häufigkeit, die von den leichten zu den schweren Elementen mit gewissen Schwankungen abnimmt, auch damals bestehen, zur Zeit jenes extremen Uranfangs?

Die Physiker sind geneigt, diesen Gedankengang völlig umzukehren: Sie erklären den Astronomen, daß ihnen unter den Weltmodellen hauptsächlich jene interessant seien, die — wie die Kurven 1 bis 3 — einen solch extremen Anfang böten. Denn diese erlaubten ihnen, sich die universelle heutige Häufigkeit der Elemente hervorgegangen zu denken aus dem mit explosiver Gewalt expandierenden und anfangs so unvorstellbar dichten Urzustand der Materie, aus dem Urbrei im Prozeß des Urknalls, wie die manchmal wortschöpferischen, aber oft etwas saloppen Physiker sagen.

In der Tat gibt es inzwischen eine Fülle von Bemühungen [3], die heutige Häufigkeitsverteilung der Elemente direkt herzuleiten aus jenem abnormen Anfangszustand. Wenn wir dieser Tendenz der heutigen Physik entgegenkommen wollen, so müssen wir allerdings erwarten, daß jede der individuellen Formen unserer Welt ein bestimmtes endliches Alter habe, das in keinem Falle größer sein dürfte als die seit dem Urknall verflossene Zeit.

Es gibt nun *neben* der Nebelexpansion eine Reihe von Daten in der Astronomie, die uns Altersabschätzungen, insbesondere an Sternhaufen, erlauben [4]. Die Zahlen, zu denen wir dabei geführt werden, sind leider sehr unscharf, liegen aber alle bei einigen Milliarden, jedenfalls alle unter 10 Milliarden Jahren. Aber von einer anderen Seite kommen erstaunlich sichere Zahlen.

Die Geologen können einerseits sagen, daß die Daten der Erdgeschichte eine fast unveränderte Leuchtkraft der Sonne von mindestens 2 Milliarden Jahren verlangen. Die Chemiker aber analysierten irdische Gesteine und kosmische Meteore und fanden, daß die Menge des beim radioaktiven Uranzerfall entstandenen Bleis und Heliums ein Alter der Meteore zwischen 3 und 5 Milliarden Jahren verlange [5].

Wenn wir also nun den Versuch machen wollen, die astronomischen Daten aus der Expansion der Welt,

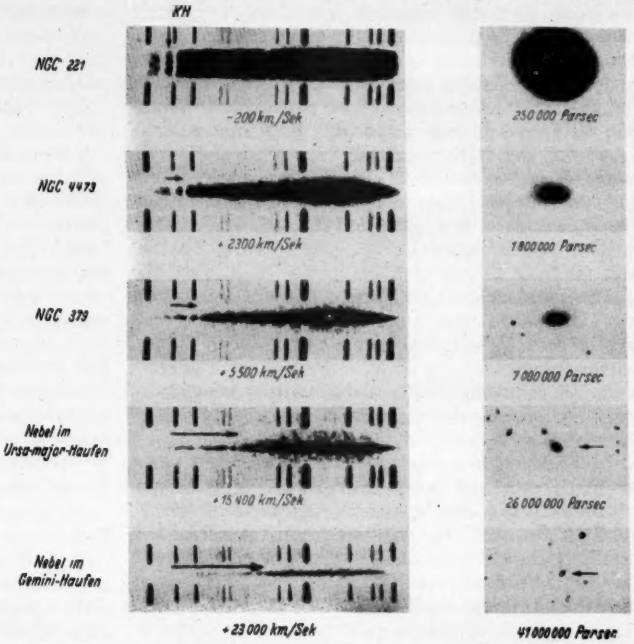

Abb. 9. Fünf Beispiele für die Proportionalität von Rotverschiebung und Entfernung. Rechts Bilder der Nebel, links ihre Spektren zwischen Heliumvergleichslinien (violett links, rot rechts). Pfeile zeigen jeweils auf die Lage des Kalziumdubletts *K* und *H*.

dem Alter der Sternhaufen und dem Alter der Meteoriten gemeinsam mit einer Theorie der Entstehung der Häufigkeitsverteilung der chemischen Elemente in ein einheitliches Bild zu bringen, so haben wir insbesondere

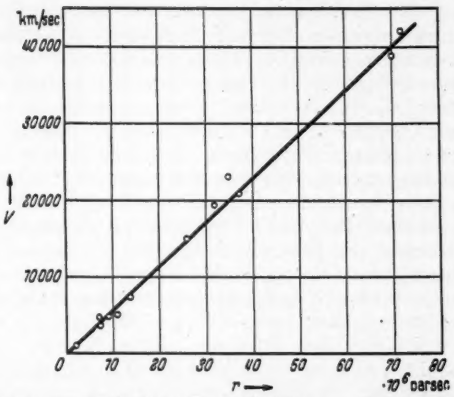

Abb. 10. Die beobachtete Proportionalität von Radialgeschwindigkeit und Entfernung.

als Astronomen zu prüfen, ob die Beobachtungen der Nebelexpansion mit einem Alter der ganzen Welt von 3 bis 5 Milliarden Jahren in Einklang zu bringen sind.

Da tritt nun die interessante Schwierigkeit auf, daß schon ein einfaches direktes Zurückrechnen mit den jetzigen Nebelgeschwindigkeiten ein Weltalter von

höchstens 1,8 Milliarden Jahren liefert und daß eine möglichst exakte Anpassung eines relativistischen Modells sogar nur 1,6 Milliarden Jahre für das Weltalter ergibt, während die ziemlich genauen radioaktiven Daten das Zwei- bis Dreifache verlangen würden.

Wenn man den Ursachen dieser Unstimmigkeit nachgehen will, so wird man die verschiedenen unabhängigen Voraussetzungen der langen Gedankenketten und die Zuverlässigkeit der empirischen Daten daraufhin zu prüfen haben, wie weit sie in die Bestimmung des Weltalters aus der Expansion eingehen.

a) Auf der Seite der Beobachtungen hat man zu fragen einmal nach der sog. „zufälligen" Unsicherheit der verwendeten Daten, die sich ihnen nur als allgemeine Unschärfe überlagert; sodann nach ihren eventuellen systematischen Fehlern, die einseitig entstellend wirken.

Die Daten selbst sind diese:

1. Die wahre Totalhelligkeit *naher* Nebel. Sie verlangt je eine Entfernungsbestimmung und eine Helligkeitsmessung.

2. Die Annahme, ferne Nebel hätten die gleiche wahre Helligkeit wie nahe, ergibt dann aus der Messung der scheinbaren Helligkeit die Entfernung.

Die Schlußweise wird nur wenig erschwert dadurch, daß nicht alle Nebel exakt gleiche wahre Helligkeit haben, daß die wahren Helligkeiten vielmehr streuen. Man wird nämlich, wenn man das Maß der Streuung in unserer Nähe bestimmt hat, den Schluß von der scheinbaren Helligkeit auf die Entfernung ferner Nebel nur als statistischen Schluß durchführen können — was aber kein prinzipieller Einwand ist (leider sind Nebeldurchmesser für diese Schlußweise weniger brauchbar, weil sie viel unsicherer bestimmbar sind).

Die Annahme aber, daß nahe und ferne Nebel im Mittel die gleiche Helligkeit haben, ist schon angesichts der langen Laufzeit des Lichtes von fernen Nebeln zu uns unbehaglich, da wir die immer ferneren Nebel in immer jüngeren Stadien sehen.

3. Die Rotverschiebung. Sie ist wohl prinzipiell nicht schwierig zu gewinnen; doch erreicht man durch den mit der spektralen Zerlegung notwendig verbundenen Lichtverlust die Grenze der Leistungsfähigkeit aller Apparaturen schon bei helleren Nebeln, und zwar rund 3 Größenklassen, bevor man an die Grenze der Wahrnehmung und damit an die Grenze einer Helligkeitsmessung der Nebel kommt. Andererseits wirkt die Rotverschiebung auch auf die Bestimmung der scheinbaren Helligkeit ein, weil in den Empfindlichkeitsbereich der photographischen Platten bei jeweils ferneren Nebeln jeweils größere Gebiete von gar nicht bekannten Spektralgebieten hereinrücken. Das ist harmlos bei jenen etwas helleren Objekten, für die wir noch irgendwie Spektren erhalten können; das wird aber prinzipiell bedenklich bei jenen schwächsten Größenklassen, für die man die Leistungsfähigkeit der größten Geräte aufs äußerste anspannen muß, um sie überhaupt wahrzunehmen, bei denen wir also sowohl den Betrag der Rotverschiebung als auch zusätzlich ihren Einfluß auf die Helligkeit durch Extrapolation erraten müssen.

Eine sorgfältige Überprüfung *der* Konsequenzen, die die genannten Daten auf die Bestimmung des *Weltalters* haben, soweit es aus der Expansion der Nebel gewonnen wird, zeigt nun folgendes:

Zwar erhält man durch optimale Anpassung eines relativistischen Modells an die Beobachtungen ziemlich direkt eine Kurve vom Typus 3: Rasche Expansion vom Urzustand, darauf Verzögerung für einige Zeit und schließlich Expansion mit wachsender Geschwindigkeit. Aber schon allein die *zufällige* Unsicherheit in den Helligkeiten und den teilweise sogar extrapolierten Rotverschiebungen, verbunden mit den natürlichen Schwankungen in den Nebelzahlen infolge kleiner Unregelmäßigkeiten ihrer Verteilung, macht die Bestimmung des momentanen Krümmungsradius des Raumes so unsicher, daß man vom Weltalter nur noch behaupten kann, es sei größer als 1 Milliarde Jahre [*6*]. Wir *brauchen* also nicht einmal die vielleicht wirklich vorhandenen systematischen Fehler zu berücksichtigen, um zu erkennen, daß die Diskrepanz zwischen den Altersbestimmungen gar nicht wichtig ist.

Da diese Tatsache nicht allgemein bekannt ist, so wurde auch eine Reihe von *anderen* Versuchen angestellt, die, wie wir sahen, nur vermeintliche Schwierigkeit zu beheben. Einige davon sind erwähnenswert.

Auf der Seite der Beobachtungen sind bereits die ersten Grundlagen, die wahren Nebelhelligkeiten und ihre Streuung, nicht über alle Zweifel erhaben [*7*]. Ebenso unterliegen die scheinbaren Helligkeiten der allerschwächsten Nebel dem Verdacht systematischer Fehler.

b) Aber auch auf der Seite der Theorie, die ja ebenfalls in die Altersbestimmung eingeht, sind sowohl konservative wie radikale Maßnahmen erwogen worden: Das einfachste und nächstliegende ist der Versuch, wenigstens leichte Inhomogenitäten zuzulassen; auch damit kann die Diskrepanz höchst einfach behoben werden [*8*].

Einige Theoretiker haben den Versuch, die Häufigkeitsverteilung der Elemente, das Alter der Meteore und die Expansion der Nebel als Ausfluß eines einheitlichen Urprozesses vor einer bestimmten Zeit zu verstehen, als radikal gescheitert angesehen [*9*]. Sie haben die, wie sie sagen, „unästhetische" Vorstellung vom Beginn des Ganzen vor endlicher Zeit fallenlassen und eine Theorie aufgebaut, nach der trotz einer realen Expansion des Ganzen doch die Dichte der Materie in jedem Zeitmoment die gleiche sei. Dabei müssen sie natürlich postulieren, daß die durch die Expansion hervorgerufene Verdünnung durch eine kontinuierliche Neuentstehung von Materie aus dem Nichts kompensiert werde. Sie lassen also bewußt das Rahmengesetz von der Erhaltung der Masse fallen. Es gibt in dieser Theorie keine einsinnige und einheitliche Geschichte der ganzen Welt. Jeder Teil ist wie das Ganze gleich ewig, da allem Alternden und Davonstrebenden gleich wieder Neuentstehendes die Waage hält.

So raffiniert diese Theorie auch erscheint, die nun natürlich die Elementverteilung entweder aus dem Nichts mitentstehen läßt oder in besondere Sterne verlegt, so verwundbar ist sie auch. Sie behauptet ja, daß beliebige Teile der Welt, also auch beliebig ferne Teile, stets im gleichen Zustand seien! Ferne und fernere Teile sehen wir aber wegen der langen Laufzeiten des Lichtes in immer früheren Zuständen. *Wenn* wir nun fänden (durch Beobachtung!), daß ferne Objekte systematisch andere Eigenschaften zeigten als nähere, insbesondere Anzeichen größerer Jugend?

Diese Anzeichen gibt es tatsächlich: Sorgfältige Farbmessungen an Nebeln ergaben, daß eine bestimmte Klasse von Nebeln, die elliptischen oder E-Nebel, in

großen Entfernungen eine zunächst unverständliche starke Rötung annehmen, die andere Nebel nicht zeigen [*10*]. Die einzige bisher brauchbare Erklärung nimmt an, diese Nebel müßten in ihrer Jugend (in der wir sie ja sehen) einen hohen Prozentsatz von inzwischen erloschenen roten Sternen gehabt haben.

Eine noch radikalere Theorie nimmt zwar die strikte und exakte Homogenität als Basis, läßt aber die klassischen und relativistischen Rahmengesetze, ja die Begriffe der „Masse", der „Kraft" und andere fallen [*11*]. Sie behauptet im Weiteren, es sei ihr möglich, ad libitum das Expansionsphänomen als wirklich oder als scheinbar aufzufassen; das hänge einfach davon ab, mit welcher von zwei möglichen Zeiten man rechne. Es läßt sich aber zeigen, daß diese Theorie die Begriffe „wirkliche" und „scheinbare" Expansion willkürlich definiert, so daß ihr Unterschied von den anderen behandelten Theorien nur und ausschließlich eine Frage der Terminologie und *nicht* des Wahrheitsgehaltes der Theorie ist.

Wir könnten noch sprechen von Theorien, die die Naturkonstanten variabel machen, die Gravitationskonstante [*12*], das PLANCKsche Wirkungsquantum, die Lichtgeschwindigkeit. Erlauben Sie mir aber bitte, sie an dieser Stelle abzutun mit dem Worte WILHELMs VON OCCAM: „Entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem."

c) Lassen Sie uns also lieber zurückkehren zu den wohlfundierten Beobachtungsprogrammen, die jetzt an verschiedenen Stellen, besonders aber auf Mt. Palomar, ihren Anfang nehmen und die geeignet sind, die zufälligen und systematischen Ungenauigkeiten der empirischen astronomischen Daten zu verringern und die — gottlob — außer der Prüfung kosmologischer Theorien unser noch verhältnismäßig skizzenhaftes Bild von der Welt der Nebel reicher und vollständiger zu machen versprechen:

1. Da sind zunächst die bis zu den allerschwächsten Nebeln führenden Nebelzählungen, die man nun nicht nur stichprobenartig, sondern in großen zusammenhängenden Gebieten vornimmt. Die einzige Schwierigkeit, die man dabei allenfalls fürchten muß, ist die Verwechslung von Sternen und Nebeln nahe der Empfindlichkeitsschwelle der photographischen Platte. Aber ich glaube, daß diese Schwierigkeit deshalb nicht wichtig ist, weil im Gebiet der allerschwächsten heute erreichbaren Sterne und Nebel, bei der 21. und 22. Größenklasse, die Nebel längst viel zahlreicher geworden sind als die Sterne.

2. Da sind weiter die Messungen der scheinbaren Helligkeit bei den *gleichen* ganz schwachen Nebeln. Einen Teil der bisherigen Schwierigkeiten wird das für Intensitäts*messungen* der photographischen Platte überlegene Mittel der photoelektrischen Zelle in irgendeiner ihrer modernen Variationen beseitigen. Man wird aber auch heute noch große Mühe haben, für die schwächsten Nebel jene notdürftige Kenntnis ihres Spektrums zu erhalten, die nötig ist, um die durch die Rotverschiebung zusätzlich nötig werdenden Korrekturen der scheinbaren Helligkeiten ermitteln zu können.

3. Die Rotverschiebungsmessungen wird man natürlich bis zu schwächeren Nebeln fortsetzen. Man wird sich aber besonders vergewissern müssen, ob die Expansionsgeschwindigkeit nicht von der Richtung im Raum abhängt, ob also nicht vielleicht eine Anisotropie herrscht.

4. Eine prinzipielle Komplikation allerdings kommt durch die schon vorhin erwähnte Beobachtung einer abnormen Rötung ferner elliptischer Nebel ins Spiel. Wird sie hervorgerufen durch einen hohen Prozentsatz roter Sterne in der Jugend dieser Nebel, so müssen wir darauf gefaßt sein, daß der Anteil dieser roten Sterne an der wahren Gesamthelligkeit dieser Nebel ganz unbestimmt bleibt. Diese Nebel werden damit leider für die Untersuchung von Feinheiten in der so fundamentalen Beziehung von Rotverschiebung und Entfernung höchst fragwürdig. Der Übergang zu anderen Nebeltypen, die die abnorme Rötung nicht zeigen, ist zwar ein Ausweg. Doch weiß man nicht, wie weit er führt.

Ich glaube nicht, daß es schwer sein wird, Weltmodelle im Rahmen der Relativitätstheorie zu finden, die sich den astronomischen Beobachtungen der nächsten Jahre befriedigend anpassen lassen und die gleichzeitig die Möglichkeit bieten, die Entstehung der heutigen Verteilung der chemischen Elemente verständlich zu machen.

d) Allerdings lauert im Hintergrund noch immer eine Frage: Woher nimmt man das Recht, die Rotverschiebungen der Nebel als wirkliche DOPPLER-Effekte, als Anzeichen einer realen Expansion zu deuten? Die Antwort hat mehrere Stufen:

Zunächst kennen wir bisher keinen physikalischen Effekt, der den gleichen Typus von Linienverschiebung hervorruft wie der DOPPLER-Effekt. Ferner: *Wenn* man einen solchen Effekt aber einmal fände, so entstünde das äußerst komplizierte Problem, zu entscheiden, wann ein echter, wann ein unechter DOPPLER-Effekt vorliege. Dürfen wir dann sagen, innerhalb der Milchstraße gelte der DOPPLER-Effekt und auch bei der Beobachtung innerer Rotationen von Nebeln, nicht aber für einen Nebel als Ganzes?

Diese Zweideutigkeit in der Interpretation der Beobachtungen sollten wir nicht ohne Not herbeisehnen. Und schließlich: Selbst *wenn* die Trennung von echtem und unechtem Effekt einst gelänge, so wäre damit nur ein neues großes kosmologisches Problem gestellt, nämlich eine statische Welt verständlich zu machen, die doch völlig instabil ist, während eine nichtstatische Welt dem theoretischen Verständnis keine Schwierigkeiten bereitet.

Wer sich heute auf den noch nicht entdeckten unechten DOPPLER-Effekt beruft, wünscht wohl der vermeintlichen Phantastik von höchst naheliegenden und dringenden Folgerungen für das Weltganze zu entgehen, und er beraubt die Physik, Astrophysik und Astronomie der Möglichkeit, ein Bild von großer und früher ungeahnter Einheitlichkeit zu entwerfen, das konsequent zu durchdenken unserer Generation aufgegeben ist, das Bild einer wirklichen Weltgeschichte!

Literatur.

[*1*] HECKMANN: Theorien der Kosmologie. Berlin 1942. — [*2*] HUBBLE: Das Reich der Nebel. Braunschweig 1938. — [*3*] ALPHER u. HERMAN: Rev. Mod. Physics **22**, 153 (1950). — [*4*] BOK: Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **106**, 61 (1946). — [*5*] HOLMES: Endeavour **6**, 99 (1947). — Nature **157**, 680 (1946). — [*6*] HECKMANN: Unveröffentlicht. — [*7*] BEHR: Schriftliche Mitteilungen an den Verfasser. — [*8*] OMER: Ap. J. **109**, 164 (1949). — [*9*] GOLD, BONDI, HOYLE: Vgl. das Ref. von McCREA. Endeavour **1950**, H. 33. — [*10*] STEBBINS and WHITFORD: Ap. J. **108**, 413 (1948). — [*11*] MILNE: Kinematic Relativity. Oxford 1948. — [*12*] JORDAN: Die Herkunft der Sterne. Stuttgart 1947.

Hamburger Sternwarte, Hamburg-Bergedorf.

Eingegangen am 10. November 1950.

Materie und Energie unter kosmischen Verhältnissen*).

Von H. KIENLE, Heidelberg.

Die Astronomie des 18. und 19. Jahrhunderts ist Himmelsmechanik. Das NEWTONsche Gravitationsgesetz ist ihre Grundlage, Mathematik ihre Methode, das Planetensystem ihr vornehmster Gegenstand. Soweit sie darüber hinaus greift, sind die Sterne nichts weiter als bewegte Massenpunkte, wird das Milchstraßensystem in Analogie zum Planetensystem als rein mechanisches System aufgefaßt, nach dessen die Bewegungen beherrschender Zentralsonne man sucht, wird der Gesamtaufbau der Welt in einer Hierarchie von Systemen verschiedener Ordnung gesehen, die alle dem einen Grundgesetz der Mechanik gehorchen.

Die Anfänge einer Physik der Sterne liegen da, wo man von der reinen Richtungsmessung, der Geometrie mit Lichtstrahlen, fortschreitet zur Messung von Quantität und Qualität der von den Sternen kommenden Strahlung. Photometrie und Spektroskopie der Gestirne sind die ersten Kapitel einer Astrophysik, die zunächst nur mehr in der Methode physikalisch ist als in der eigentlichen Zielsetzung. Noch 1913 bezeichnet der Astronom HUGO VON SEELIGER in seinem Vortrag vor der Naturforscherversammlung in Wien die neue Astronomie, die durch Anwendung physikalischer Methoden, besonders der Spektralanalyse, Photometrie und Photographie charakterisiert ist, als eine Kette fortgesetzter Bestätigungen des Gesetzes von NEWTON. Die systematischen Helligkeitskataloge der ersten Zeit dienen der klassischen Stellarastronomie nur als statistische Hilfsmittel zur Festlegung der Entfernungen der Sterne; einen physikalischen Sinn erhalten sie erst in einer sehr viel späteren Zeit, die in der absoluten Leuchtkraft eine der wichtigsten Größen erkennt, die den Zustand eines Sterns beschreiben. Die FRAUNHOFERschen Linien im Sonnenspektrum sind zunächst nur Wellenlängenmarken und werden in der Deutung durch BUNSEN und KIRCHHOFF Grundlage einer qualitativen chemischen Spektralanalyse der Gestirne; die Auswertung ihrer Intensitäten für die quantitative Analyse der Sternatmosphären und die Bestimmung von Temperaturen, Drucken und Dichten ist unseren Tagen vorbehalten geblieben. Die nach dem DOPPLERschen Prinzip als Bewegungen in der Gesichtslinie gedeuteten Linienverschiebungen in den Spektren der Sterne, deren Messung eine Hauptdomäne der werdenden Astrophysik des ausgehenden 19. Jahrhunderts ist, liefern nichts weiter als eine Komponente der Bewegungen der Sterne, die Radialgeschwindigkeit, gehören in der Zielsetzung also noch ganz der Epoche der Himmelsmechanik an; die Fülle dessen, was aus Linienverschiebungen auf physikalische Vorgänge im Kosmos geschlossen werden kann, hat sich erst uns aufgetan.

Die führenden Astronomen des ausgehenden 19. und noch des beginnenden 20. Jahrhunderts kommen von der Mathematik her; auch da, wo sie dem Namen nach Astrophysiker sind, verleugnet sich diese Grundhaltung im Denken nicht. „Wechselwirkungen zwischen Astronomie und Mathematik" ist ein Thema, das gern zum Gegenstand akademischer Reden und Vorträge vor größeren Kreisen gemacht wird. Zwar lassen sich da und dort schon im 19. Jahrhundert Ansätze zu einer echten Physik der Sterne nachweisen — wenn z. B. JULIUS ROBERT MEYER und HELMHOLTZ nach den Quellen der Sonnenenergie fragen oder RITTER und LANE das Verhalten von Gaskugeln unter thermodynamischen Gesichtspunkten betrachten —, der eigentliche Einbruch der Physik in die Astronomie aber ist erst von unserer Generation vollzogen worden. Das Thema „Sterne und Atome" ist durch EDDINGTONs berühmt gewordenen Vortrag vor der British Association im Jahre 1926 in die astronomische Literatur eingeführt worden. Um die gleiche Zeit habe ich nach einem Besuch bei FELIX KLEIN, bei dem er sich über die Situation in der Astronomie berichten ließ, einen kleinen Aufsatz in den Naturwissenschaften unter dem Titel „Astronomie als angewandte Physik" veröffentlicht. Diese Formulierung klingt heute beinahe trivial, damals bedeutete sie noch ein Programm und wurde von vielen als überspitzt empfunden.

Aufgabe der Astronomie als einer Physik des Kosmos ist die Beschreibung und Deutung der Zustände und der Zustandsänderungen in der Welt. Diese Zustände werden erfaßt in der Dualität von Materie und Energie. Für die klassische Physik ist Materie das in seinen kleinsten Einheiten, den Atomen, Unzerstörbare und Unwandelbare, durch feste Zahlenwerte, die Masse, gekennzeichnet; die Energie, ihrem Betrag nach unveränderlich, ist in der Form wandelbar, mit der allgemeinen Tendenz einer zunehmenden Degeneration im Sinne einer Vermehrung der nicht mehr in andere Formen überführbaren Wärme und dem düsteren Ausblick auf einen schließlichen „Wärmetod" der ganzen Welt.

OSTWALDs Versuch einer Beseitigung der Dualität von Materie und Energie durch eine monistische Energetik mußte zunächst scheitern angesichts der Erfolge der Atomtheorie, die mit dem PLANCKschen Wirkungsquantum auch die Energie aus kleinsten diskreten Einheiten zusammensetzte. Aber die aus den Experimenten mit schnellbewegten Elementarteilchen gewonnene Erkenntnis, daß Bewegung die Masse scheinbar vergrößert, daß die Energie also auch Masse hat, die von EINSTEIN gefundene Formel Energie = Masse mal Quadrat der Lichtgeschwindigkeit und die Aufdeckung der Dualität Welle — Korpuskel in den Erscheinungsformen der Materie sowohl wie der Energie führten zu der heute allgemein anerkannten Auffassung, daß Materie und Energie nur verschiedene Erscheinungsformen ein und desselben Etwas sind, für das noch keine neue Bezeichnung geprägt ist, dessen Quantität wir in jeder beliebigen der für Masse oder Energie bisher benutzten Einheiten angeben können. Den Energieäquivalenten, die es gestatten, in mkg ausgedrückte mechanische Energie in Kalorien (Wärmeenergie) oder Kilowattstunden (elektrische Energie) oder erg (die absolute Einheit der Energie) umzurechnen, stellt sich das Masseäquivalent der Energie nach der EINSTEINschen Gleichung zur Seite, demzufolge ein Gramm Masse einer Energie von 900 Trillionen erg oder 9 Billionen mkg oder 21 Milliarden Kalorien oder 25 Millionen kWh äquivalent ist. Und dieses „Äquivalent" ist kein nur formaler Umrechnungsfaktor, die gegenseitige Umwandelbarkeit von Masse und Energie ist vielmehr eine Realität, die in

*) Vortrag, gehalten auf der Tagung der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte in München am 24. Oktober 1950.

vielen Experimenten der letzten Jahre verwirklicht worden ist und die das Geschehen im Kosmos weitgehend bestimmt. Die rationelle Einheit der Energie, die der Kernphysiker daher heute allgemein verwendet, ist die TME ($^1/_{1000}$ Massen-Einheit), das ist ein Tausendstel der Masse des Protons.

Wenden wir uns nach dieser Klärung der Begriffe zunächst der als „Materie" bezeichneten Erscheinungsform dieses Etwas zu, das wir vielleicht versuchsweise einmal mit der neutralen Bezeichnung „Inhalt der Welt" belegen wollen, so ist zu sagen, daß wir den Zustand der Materie durch gewisse Zustandsgrößen beschreiben, die einer Zustandsgleichung genügen. Die wichtigsten dieser Zustandsgrößen sind Temperatur, Druck und Dichte; das einfachste Beispiel einer Zustandsgleichung ist das für ideale Gase gültige Gesetz, wonach der Druck dem Produkt aus Dichte und absoluter Temperatur proportional ist. Zur vollständigen Beschreibung des Zustandes gehören noch eine Reihe anderer Größen, die sich auf die Zusammensetzung der Materie aus Elementarteilchen beziehen: Molekular- bzw. Atomgewicht, Dissoziations- und Ionisationsgrad. Sie erscheinen als Parameter in der Zustandsgleichung neben gewissen fundamentalen Naturkonstanten.

Der Astronom kann die Zustandsgrößen der Materie selbst nicht unmittelbar beobachten. Er kann weder Thermometer noch Manometer ansetzen, um Temperaturen und Drucke zu messen, noch auch die Dichte der Materie durch direkte Wägung bestimmen. Der Weg zu den physikalischen Zustandsgrößen führt über gewisse astronomische Zustandsgrößen, die aus der Analyse der von den Sternen und Nebeln ausgesandten Strahlung abgeleitet werden können. Diese astronomischen Zustandsgrößen sind für Sterne die Masse und der Radius, die absolute Leuchtkraft und die effektive Temperatur. Auch sie gehorchen einer Zustandsgleichung, die gewöhnlich unter der Bezeichnung „Masse-Leuchtkraft-Gesetz" geht und die neben den Zustandsgrößen selbst auch wieder gewisse Parameter enthält, vor allem solche, die die Wechselwirkung zwischen Materie und Strahlung betreffen (Erzeugung und Transport der Energie).

Bei der Materie unterscheiden wir grob qualitativ drei Aggregatzustände: fest, flüssig, gasförmig. Durch Variation von Druck und Temperatur kann eine vorgegebene Menge Materie von dem einen in den anderen Zustand übergeführt werden. Man kann feste Körper durch Erhitzen schmelzen und verdampfen, kann Gase durch Abkühlung und Kompression verflüssigen, kann Flüssigkeiten auskristallisieren, Schmelzen zum Erstarren bringen. Ob wir im irdischen Laboratorium die Umwandlung bei einem bestimmten Stoff erreichen können oder nicht, ist eine Frage der Realisierbarkeit der dafür notwendigen Bedingungen; den Drucken und Temperaturen, die wir anwenden können, sind gewisse Grenzen gesetzt, die durch die Entwicklung der Technik stetig erweitert werden. Es ist Aufgabe der theoretischen Physik, aus den Experimenten allgemein gültige Gesetze abzuleiten, die es erlauben, das Verhalten der Materie auch in dem Bereich, der nicht unmittelbar experimentell erfaßbar ist, zu beschreiben. Wenn immer wir es mit echten Naturgesetzen zu tun haben, dann darf sich ihre Gültigkeit nicht beschränken auf den engen Raum des irdischen Laboratoriums, sondern muß sich auf die ganze Weite der Welt erstrecken, die damit zum kosmischen Laboratorium wird, in dem physikalische Theorien der schärfsten Prüfung unterzogen werden.

Drei Punkte sind es vor allem, in denen sich die Verhältnisse im kosmischen Laboratorium von denen im irdischen unterscheiden. In den Sternen und Sternsystemen sind Massen zusammengeballt, die das Vielmillionenfache dessen betragen, was je im größten technischen Versuch auf der Erde an Materiemengen ins Spiel kommen kann. Der Materie stehen andererseits Räume zur Verfügung, in denen sie Verdünnungen annehmen kann, die das höchste im Laboratorium erzeugbare Vakuum um viele Zehnerpotenzen übertreffen. Und für den Ablauf der Reaktionen kommt die ganze Weite der Zeitskala in Betracht von den Millionsteln der Sekunde bis zu vielen Millionen von Jahren.

Man weiß, welche Schwierigkeiten unter Umständen der Übergang von einer unter Laboratoriumsbedingungen studierten Reaktion zum technischen Großversuch bereitet. Nicht immer gibt es, wie bei gewissen Problemen der Hydrodynamik, eine „REYNOLDSsche Zahl", die die Umrechnung auf andere Dimensionen ermöglicht. Es kann durchaus vorkommen, daß gerade die Größe der Massen, die zur Reaktion gebracht werden, eine entscheidende Rolle spielt und den Ablauf grundsätzlich verändert. Es sei nur erinnert an eines der bekanntesten Beispiele aus der jüngsten Zeit: Die Kettenreaktion, die im Atommotor oder in der Atombombe ausgenützt wird, setzt eine gewisse Mindestmasse der aktiven Substanz voraus. Zwei gleichgroße Massen des Uran 235, die je für sich unter der kritischen Grenze liegen, sind harmlos, erst vereinigt entwickeln sie die ungeheueren Energien des Atomzerfalls.

So kommt es, daß wir die Masse als eine der wichtigsten astronomischen Zustandsgrößen zu betrachten haben. Zwar gilt der von RUSSELL und VOGT aufgestellte Satz, daß Masse und chemische Zusammensetzung allein den ganzen Aufbau eines Sternes bestimmen, nur mit gewissen Einschränkungen, aber seine Formulierung beleuchtet doch die Situation. Ob wir aus vorgegebenem Material (Mischung von verschiedenen Elementen) einen Stern von den Eigenschaften der Sonne oder einen Planeten wie die Erde oder einen Riesenstern wie Beteigeuze formen können, hängt in erster Linie von der Menge dieser Materie ab. Durch die Masse ist die Leuchtkraft festgelegt, und es bleibt nur ein enger Spielraum für Durchmesser und Temperaturen.

Um eine erste Vorstellung zu gewinnen von dem Zustand, in dem sich die Materie in den Sternen befindet, beginnen wir mit einer Analyse der Sonne, für die wir alle notwendigen Unterlagen besitzen. Wir kennen die Masse ($2 \cdot 10^{33}$ g) und den Radius ($7 \cdot 10^{10}$ cm) und errechnen daraus die mittlere Dichte der Sonnenmaterie zu 1,4 g/cm³, d.h. etwas größer als die des Wassers. Die örtliche Dichte wird im Innern der Sonne nicht überall die gleiche sein, sondern von außen nach innen zunehmen. Wie groß der Dichtegradient ist, kann nur durch theoretische Modellrechnungen ermittelt werden. Man kann aber ohne spezielle Voraussetzungen über die Zusammensetzung und die Zustandsgleichung der Sonnenmaterie Mindestwerte für den Druck ableiten, der im Mittelpunkt der Sonne herrschen muß, einfach aus der Überlegung,

daß auf den Massen im Innern das Gewicht der über ihnen liegenden äußeren Teile lastet. Man kommt dann zu dem Schluß, daß die Materie dort unter einem Druck steht, der größer als $1^1/_2$ Milliarden Atmosphären ist, und daß im Mittel im ganzen Innern der Sonne Drucke von vielen Hundert Millionen Atmosphären herrschen. Machen wir nun noch die einzige Annahme, daß die Sonne eine Gaskugel ist (was durch den für die hohen Drucke sehr niedrigen Wert der Dichte nahegelegt wird), dann können wir mit Hilfe der Zustandsgleichung der Gase auch Mindestwerte für die Temperaturen im Innern dieser Gaskugel berechnen. Es ergibt sich, daß diese Temperaturen höher liegen als eine Million Grad. Von hier aus aber erlaubt nun die Atomtheorie einen Schluß auf den Zustand der Materie im Innern der Sonne.

Wir wissen, daß wir den Atomen der verschiedenen Elemente, die je aus einem Kern und einer bestimmten Anzahl von diesen Kern umkreisenden Elektronen bestehen, durch Erhöhung der Temperatur ihre Elektronen entreißen, daß wir sie „ionisieren" können. Diese Ionisation kann für die schweren Elemente, deren Atome im Normalzustand eine größere Zahl von Elektronen besitzen (Eisen z.B. 26), je nach der Höhe der Temperatur verschiedene Stufen annehmen, von der Entreißung eines Elektrons (einfache Ionisation) bis zur Abspaltung aller Elektronen (vollständige Ionisation). Bei den im Innern der Sonne herrschenden Temperaturen sind die leichten Elemente vollständig ionisiert, die schwereren so weit, daß den Atomen nur noch einige Elektronen der innersten Schale verblieben sind. Das „Sternengas", aus dem die Sonne aufgebaut ist, besteht also aus einer Mischung von freien Elektronen und nackten oder fast nackten Kernen der verschiedenen Elemente. Der Physiker bezeichnet diesen Zustand im Gegensatz zu dem aus neutralen oder wenig ionisierten Atomen bestehenden Atomgas, mit dem er es im Laboratorium im allgemeinen zu tun hat, als „Elektronengas".

Wie das Mischungsverhältnis von Kernen und freien Elektronen in diesem Elektronengas ist und welches mittlere Molekulargewicht ihm dementsprechend zugewiesen werden muß, das hängt davon ab, mit welcher relativen Häufigkeit die einzelnen Elemente in dem Stoff, aus dem die Sonne gemacht ist, vertreten sind. Das Elektronengas einer reinen Wasserstoffsonne wäre zu gleichen Teilen aus freien Elektronen und Protonen zusammengesetzt und hätte entsprechend der Verteilung der Masse 1 auf zwei Teilchen das Molekulargewicht 1/2. Bei einer Heliumsonne käme auf je zwei Elektronen ein Heliumkern der Masse 4, das Molekulargewicht wäre 4/3. Bei einer Eisensonne dagegen käme auf je 23 freie Elektronen ein nur noch von drei Elektronen umkreister Eisenkern der Masse 56, das Molekulargewicht eines solchen Eisenelektronengases wäre also $56/24 = 2{,}3$. Für noch schwerere Elemente ändert sich dieser Wert nur noch ganz wenig; Uran im Zustande vollständiger Ionisation hat das mittlere Molekulargewicht 2,6.

Für eine Mischung aus Wasserstoff, Helium und schwereren Elementen ergibt sich im Zustand des Elektronengases ein Molekulargewicht zwischen 0,5 und etwa 2,6, der außerordentlich klein ist verglichen mit dem Spielraum der Molekulargewichte für Atomgase von 1 für Wasserstoff, 56 für Eisen bis 238 für Uran. Die Eigenschaften des Sternengases sind also, soweit sie durch das Molekulargwicht beschrieben werden, stark vereinfacht. Sie werden wesentlich bestimmt durch den Gehalt an Wasserstoff und Helium; nur diese beiden Atomarten können das Molekulargewicht stark unter den Wert 2 herabdrücken.

Nun geht aber das Molekulargewicht über die Zustandsgleichung des Sonnen-Elektronengases in die astronomische Zustandsgleichung, die Masse-Leuchtkraft-Beziehung, ein. Sind alle anderen Parameter in dieser Gleichung bekannt, dann kann sie benutzt werden, das mittlere Molekulargewicht der Sonnenmaterie aus Masse und Leuchtkraft zu bestimmen.

Die Gleichung hat im allgemeinen zwei Lösungen. Es bleibt die Wahl zwischen einem Gehalt der Sonnenmaterie an Wasserstoff + Helium in der Gegend von 30 bis 40% oder von beinahe 100%. Die Astronomen haben lange geglaubt, der ersten Lösung den Vorzug geben zu müssen, obwohl schon früh Stimmen laut wurden, die dem Wasserstoff als „Weltbaustoff" das Wort redeten. Eine Reihe von Erkenntnissen der letzten zwei Jahrzehnte haben mit einer gewissen Zwangsläufigkeit dazu geführt, daß wir die zweite Lösung als die von der Natur verwirklichte anerkennen müssen. Aus der quantitativen Analyse des Linienspektrums der Sonne ergab sich für die äußeren Schichten, in denen die FRAUNHOFERschen Linien entstehen, eine Häufigkeitsverteilung der Elemente, die grob durch die folgenden Zahlen charakterisiert werden kann:

Auf 100000 Atome Wasserstoff kommen 16000 Atome Helium, 330 Atome der Sauerstoffgruppe (Ne 115, O 95, N 75, C 45) und höchstens noch 22 Atome anderer Elemente (darunter Fe 9, Mg 6, Si 5). In Gewichtsprozenten ausgedrückt bedeutet das, daß 96,32% der gesamten Masse in Form der leichtesten Atomkerne, Wasserstoff (59%) und Helium (37,3%) vorhanden sind und 3,37% als leichte Atome bis zur Ordnungszahl 16 (S), während alle schwereren Atome zusammen nur 0,31% (davon Eisen allein 0,30%) der Masse ausmachen.

Man kann hinreichende Gründe dafür angeben, daß diese zunächst nur für die äußeren Schichten der Sonne gültige Zusammensetzung repräsentativ ist auch für die Materie im ganzen Innern. Die Durchmischung durch Konvektionsströme ist so kräftig, daß eine Sonderung der Elemente von innen nach außen, wenn sie überhaupt einmal vorhanden wäre, nicht aufrecht erhalten werden kann.

So wäre denn das Sonnen-Elektronen-Gas hinsichtlich seiner Zusammensetzung aus Elementarteilchen gekennzeichnet durch

a) einen weit überwiegenden Gehalt an Wasserstoff- und Heliumkernen (Protonen und α-Teilchen), die zusammen über 96% der Masse ausmachen,

b) ein Verhältnis Helium zu Wasserstoff von 1:6 in Atomzahlen bzw. 2:3 in Gewichtsprozenten,

c) geringe Beimengungen von Kernen der Elemente der Ordnungszahl 6 bis 14 und 26 in den relativen Häufigkeiten C:N:O:Ne:Mg:Si:Fe = 9:15:19:23:1:1:2, während die zwischen He und C liegenden leichten Elemente der Ordnungszahlen 3 (Li), 4 (Be) und 5 (B) praktisch überhaupt nicht vertreten sind (Häufigkeit gegenüber Si kleiner als 1:100000).

Die Sonne ordnet sich als Stern in eine Reihe ein, die heute allgemein als „Hauptreihe" bezeichnet wird;

ihr gehören rund $^9/_{10}$ aller überhaupt bekannten Sterne an. Diese Hauptreihe ist gekennzeichnet durch einen weiten Spielraum der Leuchtkräfte von etwa 10^{-2} bis 10^5 (in Einheiten der Leuchtkraft der Sonne) und eine enge Koppelung der anderen Zustandsgrößen mit der Leuchtkraft in dem Sinne, daß Masse, Radius und effektive Temperatur mit der Leuchtkraft abnehmen, die Massen von 20 bis 0,3 Sonnenmassen, die Radien von 10 bis 0,5 Sonnenradien, die Temperaturen von 30000 bis 2500°. Für die mittleren Dichten ergibt sich daraus ein Spielraum von rund zwei Zehnerpotenzen (0,03 bis 3 g/cm³); die Sonne liegt mit 1,4 auf der Seite der größeren Dichten.

Man darf daraus schließen, daß der physikalische Zustand der Materie im Innern der Sterne der Hauptreihe nicht wesentlich verschieden sein kann von dem im Innern der Sonne, daß wir es also auch hier mit einem Elektronengas zu tun haben.

Aus der Gültigkeit einer einheitlichen Masse-Leuchtkraft-Beziehung für den ganzen Bereich der Hauptreihe kann weiterhin gefolgert werden, daß auch das mittlere Molekulargewicht nicht sehr verschieden ist, daß also zumindest der Gehalt an Wasserstoff + Helium von ähnlicher Größe ist wie bei der Sonne. Die quantitative Analyse des Linienspektrums ausgewählter Sterne hat darüber hinaus auf die gleichen relativen Häufigkeiten der Elemente überhaupt geführt, insbesondere auf das gleiche Verhältnis Helium:Wasserstoff. Wir dürfen daher den gegenwärtigen Stand unserer Kenntnis vom Zustand der Materie im Innern der normalen Sterne der Hauptreihe mit genau den Worten beschreiben, mit denen wir das für die Sonne getan haben:

Im Innern der Sterne der Hauptreihe befindet sich die Materie bei Dichten der Größenordnung 1 und Temperaturen der Größenordnung 20 Millionen Grad im Zustand des Elektronengases. Dieses Elektronengas setzt sich zusammen aus freien Elektronen, Protonen und α-Teilchen mit geringen Beimengungen von Kernen der Elemente höherer Ordnungszahlen. Es kommen auf 1000 Elektronen 740 Wasserstoff-, 118 Helium- und knapp drei schwerere Kerne. Dieses Elektronengas wird durchflutet von einem kräftigen Strom von Photonen (Lichtquanten), der in ständiger Wechselwirkung mit der Materie (Absorption und Reemission) die in den innersten Teilen des Sternes durch atomare Prozesse erzeugte Energie nach außen führt.

Welcher Art diese atomaren Prozesse sind, dafür gibt die chemische Zusammensetzung einige Anhaltspunkte. Die wesentliche Rolle scheint der Aufbau von Helium aus Wasserstoff zu spielen, sei es über die Proton-Proton-Reaktion oder über einen Kreisprozeß, bei dem C- und N-Kerne verschiedener Masse als Zwischenstufen ins Spiel kommen. Dem He:H-Verhältnis kommt in diesem Zusammenhang eine besondere Bedeutung zu, da es Aussagen gestattet über das mögliche Alter der Sterne.

In der letzten Zeit sind Beobachtungen gemacht worden, die man dahin deuten zu dürfen glaubt, daß das He:H-Verhältnis nicht in allen Sternen das gleiche ist, daß vielmehr die Hauptreihe aufspaltet in Parallelreihen mit verschiedenem Wasserstoff- und Heliumgehalt, ja daß man vielleicht sogar Folgen von Sternen aufweisen kann mit kontinuierlich variablem Wert des He:H-Verhältnisses. Wir wollen diese Fragen, die ebenso wie die nach der Entstehung der beobachteten Häufigkeit der Elemente in das Gebiet der Kosmogonie führen, hier nicht weiter verfolgen.

Neben den Sternen der Hauptreihe gibt es in sehr geringer Häufigkeit (höchstens 1 auf 1000) Riesen- und Überriesensterne, bei denen Leuchtkräfte von 10^2 bis 10^5 in Verbindung mit effektiven Temperaturen unter 8000° auftreten, vielfach nicht konstant, sondern periodisch oder unregelmäßig veränderlich. Die bei den Sternen der Hauptreihe so besonders ausgeprägte Korrelation zwischen Leuchtkraft und effektiver Temperatur ($L \sim T_e^6$) ist hier kaum vorhanden, sie ist eher umgekehrt in dem Sinn, daß zu den größten Leuchtkräften die niedrigeren Temperaturen gehören. Das wesentliche Kennzeichen dieser Sterne ist ihre große Ausdehnung; sie haben Durchmesser vom 5- bis 500fachen des Durchmessers der Sonne. Damit aber kommt man, da die Massen kaum größer sind als die der Hauptreihensterne, auf mittlere Dichten der Materie, die weit unter den Werten liegen, die wir für die Hauptreihe anführten, von 10^{-2} bis 10^{-6}.

Die Konstitution dieser Sterne und der Mechanismus ihrer Energieerzeugung sind noch nicht ganz befriedigend erklärt. Daß so viele von ihnen veränderliche Leuchtkräfte haben, deutet darauf hin, daß wir es hier mit teilweise instabilen und vielleicht relativ kurzlebigen Gebilden zu tun haben, die an den Anfang oder an das Ende einer möglichen Entwicklungsreihe der Sterne gehören. Umfangreiche theoretische Untersuchungen der allerletzten Zeit haben ergeben, daß man die großen Radien verstehen kann, wenn man die Voraussetzung der gleichförmigen chemischen Zusammensetzung im ganzen Innern fallen läßt und diese Sterne sich zusammengesetzt denkt aus einem Kern vom Charakter eines Hauptreihensterns und einer ausgedehnten Hülle. Kern und Hülle unterscheiden sich in der Zusammensetzung durch das He:H-Verhältnis; der Kern ist arm an Wasserstoff, die Hülle arm an Helium, bei gleichen Verhältnissen von H + He zu den übrigen Elementen.

In den inneren Teilen der Riesen und Überriesen finden wir daher die Materie in einem Zustand vor, der sich von dem im Innern der normalen Sterne nicht wesentlich unterscheidet. Es handelt sich auch hier um ein Elektronengas, nur mit möglicherweise anderem Mischungsverhältnis der Elemente, das sich auf den Mechanismus der Energieerzeugung auswirkt. Wie das verschiedene Verhältnis He:H zu deuten ist — ob als Erschöpfung des H-Gehalts durch Aufbau zu He oder genetisch — und welcher Art die Energiequellen sind, aus denen die Ausstrahlung gedeckt wird, mag uns hier nicht weiter berühren.

Auf völlig anders geartete Verhältnisse stoßen wir, wenn wir uns der Gruppe von Sternen zuwenden, die unter der Bezeichnung „*weiße Zwerge*" bekannt geworden sind. Sie unterscheiden sich rein phänomenologisch von den Sternen der Hauptreihe dadurch, daß sie mit niedriger Leuchtkraft relativ hohe effektive Temperatur verbinden; sie erscheinen daher weiß im Vergleich mit den normalen Zwergen gleicher Leuchtkraft, die rötlich gefärbt sind.

Der Begleiter des Sirius war der erste Stern, bei dem man auf die merkwürdigen Eigenschaften dieser Gruppe aufmerksam wurde. Das Aufregende war, daß sich aus der Diskussion der Bahnbewegung des Sirius für seinen Begleiter eine Masse von der ungefähren Größe der Sonnenmasse ergab, während aus der

Leuchtkraft in Verbindung mit der relativ hohen Oberflächentemperatur auf einen Radius von der Größe des Erdradius geschlossen werden mußte. Daraus aber folgte dann eine mittlere Dichte für den Begleiter von der Größenordnung 10^5.

Man hat die Realität dieser hohen Dichte zunächst angezweifelt und nach Fehlern in den bei der Berechnung gemachten Voraussetzungen gesucht. Als es indessen gelang, die von der Relativitätstheorie geforderte Rotverschiebung der Spektrallinien zu messen und damit den Nachweis zu führen, daß an der Oberfläche des Siriusbegleiters in der Tat das Gravitationspotential den einer so hohen Dichte entsprechenden Wert hat (Masse/Radius 50mal so groß wie bei der Sonne), mußte man das Ergebnis der Berechnung der Dichte als richtig hinnehmen. Und als in der Folge Sterne dieser Art in größerer Zahl bekannt wurden, mußte der weitere Schluß gezogen werden, daß wir es hier nicht mit vereinzelten Ausnahmen zu tun haben, sondern daß vielmehr die weißen Zwerge eine im Kosmos weit verbreitete Erscheinung sind. Der in ihnen verwirklichte Zustand der Materie muß als etwas durchaus „Normales" betrachtet werden, wenn wir ihn bei vielleicht einem Zehntel aller überhaupt vorhandenen Sterne vorfinden.

Diese aus astronomischen Beobachtungen gezogenen Schlußfolgerungen haben alles Beunruhigende verloren, seit die Physiker solche Zustände der Materie verstehen gelehrt haben. Wenn die Masse eines Atoms in einem Kern konzentriert ist, dessen Ausdehnung um mehrere Größenordnungen kleiner ist als die durch die Elektronenbahnen bestimmte Ausdehnung des Atoms, dann können in einem Elektronengas, das nur aus nackten Kernen und Elektronen besteht, die Elementarteilchen rein räumlich sehr viel dichter zusammenrücken, als das in einem Atomgas der Fall ist, wenn nur die dem entgegenstehenden abstoßenden Kräfte durch entsprechend hohe Drucke überwunden werden. Dichten von der Größenordnung 10^5, wie im Siriusbegleiter, erscheinen dann noch gar nicht so groß; bei dichtester Neutronenpackung wären Werte bis 10^{15} denkbar.

Ein solches Gas hat aber Eigenschaften, die es von einem gewöhnlichen Gas merklich unterscheiden. Der Physiker bezeichnet den Zustand als „entartet" und unterscheidet zwischen gewöhnlicher Entartung (Drucke von 10^8 bis 10^{18} Atm.) und relativistischer Entartung (Drucke über 10^{18} Atm.).

Man kann den Unterschied zwischen dem entarteten Elektronengas im Innern der weißen Zwerge und dem gewöhnlichen Elektronengas im Innern der Sonne durch das folgende Gedankenexperiment veranschaulichen: Bei einer mittleren Dichte der Materie von der Größenordnung 1 sind die Abstände der freien Elementarteilchen in einem Elektronengas größer als die Radien der äußeren Elektronenschalen. Wird ein solches nichtentartetes Elektronengas unter Konstanthaltung des Volumens, d.h. der Dichte, von der hohen Temperatur, bei der alle Atome fast vollständig ionisiert sind, abgekühlt, dann werden mehr und mehr freie Elektronen von den Atomionen eingefangen, die Elektronenschalen der Atome füllen sich von innen her auf, das Elektronengas geht, wenn die Temperatur weit genug gesenkt wird (auf einige Tausend Grad), in ein Atomgas über, für das immer noch die gleiche Zustandsgleichung gilt, nur mit einem entsprechend der niedrigeren Ionisierung höheren mittleren Molekulargewicht. Der Druck nimmt mit der Temperatur ab.

Bei einer Dichte der Größenordnung 10^5 dagegen sind die Elementarteilchen einander auf Distanzen nahe gerückt, die wesentlich kleiner sind als die Radien der innersten Elektronenbahnen. Wird ein solches entartetes Elektronengas bei konstantem Volumen abgekühlt, dann können offenbar die freien Elektronen nicht von den Ionen eingefangen werden, weil kein Raum vorhanden ist für die Bahnen, in denen die Elektronen die Kerne im Normalzustand umlaufen. Es ist also unmöglich, die Ionisation in einem entarteten Elektronengas durch Abkühlung rückgängig zu machen und den Zustand des Atomgases herbeizuführen. Das entartete Gas besteht bei jeder noch so niedrigen Temperatur aus einer Mischung von nackten Kernen (mit positiven Ladungen!) und freien Elektronen; der Druck ändert sich bei Änderung der Temperatur nicht.

Während bei dem nicht entarteten Gas die Ionisation, d.h. die Loslösung der Elektronen aus dem Atomverband, durch die Zusammenstöße der Teilchen infolge ihrer Temperaturbewegung (abgesehen von der Photoionisation durch Lichtquanten) erfolgt, werden im entarteten Zustand die Elektronenschalen der Atome durch den hohen Druck aufgerissen und die Kerne von ihren „zugehörigen" Elektronen getrennt. Wir sprechen daher im ersten Fall von „thermischer Ionisation", im zweiten von „Druckionisation".

Wie es mit der chemischen Zusammensetzung der Materie in den weißen Zwergen steht, ist noch nicht ganz geklärt. Das Masse-Leuchtkraft-Gesetz gilt hier nicht; die Leuchtkräfte der weißen Zwerge sind, verglichen mit denen der Hauptreihensterne gleicher Masse, 100mal kleiner. Die weißen Zwerge sind offenbar nach einem anderen Modell gebaut als die Hauptreihensterne. Man kann für ein Modell, das aus einem völlig entarteten Kern und einer normalen Hülle besteht, eine dem Masse-Leuchtkraft-Gesetz der Hauptreihe entsprechende Zustandsgleichung in Form einer Beziehung zwischen Masse und Radius ableiten, in der auch das mittlere Molekulargewicht der entarteten Materie im Kern als Parameter auftritt. Aus den noch sehr spärlichen Beobachtungsdaten hat man auf ein Molekulargewicht in der Gegend von 1,5 und damit auf geringen Wasserstoffgehalt geschlossen.

Von den Spektren kann man, ganz abgesehen davon, daß deren Eigentümlichkeiten infolge der Lichtschwäche der Objekte nur grob qualitativ bekannt sind, wenig Aufschluß über das Innere erhoffen, da bei diesen Sternen sicher die Voraussetzung gleicher Zusammensetzung von Kern und Hülle nicht erfüllt ist. Immerhin ist nicht unwichtig zu bemerken, daß es weiße Zwerge gibt, in deren Spektrum Wasserstofflinien nachweisbar sind (Siriusbegleiter) und solche, bei denen Wasserstoff offenbar auch in der äußeren Hülle fehlt.

In welchem Zustand sich die Materie in den weißen Zwergen befindet, können wir also heute verstehen; das Stichwort „entartetes Elektronengas" sagt physikalisch alles. Auch daß diese Sterne als stabile Gebilde bestehen können, haben die Modellrechnungen ausreichend belegt. Wie es dagegen zur Ausbildung solcher Zustände kommt, wo und wie also die weißen Zwerge eventuell in eine Entwicklungsreihe einzuordnen sind, das ist eine noch offene Frage.

Für die Lösung dieses Rätsels dürften einmal Zusammenhänge von Bedeutung werden, die zwischen den weißen Zwergen und anderen kosmischen Objekten bestehen und die über gewisse Verwandtschaftsreihen (mehr oder weniger phänomenologischer Art) Bande knüpfen von der entarteten Materie im Innern der weißen Zwerge zu den Hüllen der Nebelsterne, den planetarischen Nebeln und dem interstellaren Medium. *Daß wahrscheinlich mindestens ein Zehntel aller Sterne weiße Zwerge sind, also ein ganz beträchtlicher Anteil der überhaupt in der Welt vorhandenen Materie sich im entarteten Zustand befindet,* ist eine für die Geschichte der Welt vielleicht nicht ganz unwichtige Feststellung.

Theoretisch möglich und physikalisch verständlich wären noch Zustände sehr viel höherer Dichte der Materie, die durch Zerquetschung der Kerne selbst und deren Aufspaltung in Protonen und Neutronen zustande kommen. Das Elektronen-Protonen-Gas erfordert Temperaturen über 10^{10} Grad bei nur geringem Einfluß des Druckes, das Neutronengas Drucke von 10^{23} bis 10^{26} Atm. bei Temperaturen unter 10^{11} Grad; dichte Neutronenpackung führt auf Drucke über 10^{26} Atm. Ob solche Zustände im Kosmos irgendwo verwirklicht sind, entzieht sich bislang unserer Feststellung; doch steht nichts im Wege, sie bei theoretischen Überlegungen als möglich mit in Betracht zu ziehen.

Führt der Weg ins Innere der Sterne auf Zustände hoher und höchster Dichte, so stoßen wir *in den äußeren Schichten der Sterne, in den Nebeln und in den Räumen zwischen den Sternen auf Zustände hochgradiger Verdünnung, in denen die Wechselwirkung zwischen Materie und Strahlung Formen annimmt, die wesentlich verschieden sind von der im Innern der Sterne,* wo im allgemeinen mit thermodynamischem Gleichgewicht zwischen Materie und Strahlung gerechnet werden darf. Die Zusammenstöße der materiellen Teilchen, die bei einem gewöhnlichen Gas die Zustandsgleichung bestimmen, verlieren an Bedeutung. Die den Zustand charakterisierende „Temperatur" ist nicht mehr gegeben durch die kinetische Energie der materiellen Teilchen, sondern durch die Energie der die Anregung und Ionisation bewirkenden Prozesse (daher die Bezeichnung „Anregungstemperatur"); nicht die Zahl der Lichtquanten (Energiedichte) spielt die entscheidende Rolle, sondern ihre Qualität und relative Häufigkeit (Frequenzverteilung).

Der Bereich der, kosmisch gesehen, noch relativ hohen Dichten von 10^{-5} bis 10^{-10}, die wir in den Sternatmosphären vorfinden, ist dem Experiment im irdischen Laboratorium noch in beschränktem Maße zugänglich. Schon die Dichte in der Chromosphäre der Sonne aber liegt mit 10^{-14} weit unterhalb dessen, was im höchsten irdischen „Vakuum" erreichbar ist, und das gilt in noch höherem Maße für die Dichte der Materie in der Korona (10^{-16} bis 10^{-19}), in den ausgedehnten Gashüllen zahlreicher Sterne und der planetarischen Nebel (bis 10^{-22}) und im interstellaren Medium (kleiner als 10^{-23}), wo schließlich ungefähr nur noch ein einziges Atom auf den Kubikzentimeter kommt, verglichen mit den vielleicht 10^{15} Atomen je cm^3 in einer hochevakuierten Entladungsröhre.

Die Erscheinungen in den Entladungsröhren haben die Physiker veranlaßt, den Begriff des *„Plasmas"* zu prägen. Man könnte mit einiger Berechtigung den Plasmazustand als eine Art vierten Aggregatzustand von dem Gaszustand unterscheiden; denn makroskopisch ist ein Plasma zwar eine Mischung frei beweglicher Atome, Ionen, Elektronen und Photonen, kann also als ein Gas mit einem bestimmten mittleren Molekulargewicht beschrieben werden. Aber die Zustände, in denen sich die einzelnen Atome und Ionen des Plasmas befinden, werden nicht bestimmt durch die aus der Zustandsgleichung der Gase unter Voraussetzung thermodynamischen Gleichgewichts berechnete Temperatur, sondern durch die besonderen „Anregungsbedingungen".

Man kann sich den Unterschied vielleicht deutlich machen, wenn man die Antwort zu geben versucht auf die so oft gestellte Frage nach der „Temperatur im Weltenraum". Ein irgendwo in dem Raum zwischen den Sternen befindliches Kohlestäubchen, das die Bedingung des idealen schwarzen Körpers erfüllt, alle auffallende Strahlung vollständig zu absorbieren, nimmt eine Temperatur an, die sich aus der Energiedichte der den interstellaren Raum erfüllenden Strahlung nach dem STEFAN-BOLTZMANNschen Gesetz zu 3° abs. berechnet. Diese nur wenig über dem absoluten Nullpunkt liegende Temperatur würde auch die Gasfüllung eines allseitig geschlossenen Kessels mit absolut schwarzen Wänden (Weltraumschiff!) annehmen müssen, ganz gleichgültig, welches Gas für die Füllung verwendet würde. Eine merkliche „thermische" Anregung oder gar Ionisation der Atome innerhalb des Kessels wäre unmöglich.

Wird dieses Gas nun aber aus seinem Kessel in den freien Raum gelassen, dann ändern sich die Verhältnisse von Grund auf. Nun spielen auf einmal die spezifischen Eigenschaften der Gasatome eine Rolle; es kommt ganz darauf an, auf welche Frequenzen der Strahlung die Atome ansprechen. Da die relative Intensitätsverteilung der im interstellaren Raum vorhandenen Strahlung (Energieverteilung der Lichtquanten) der Intensitätsverteilung der mittleren Sternstrahlung entspricht, kann sie physikalisch genähert als „verdünnte" Strahlung der effektiven Temperatur 15000° beschrieben werden. Die Strahlung enthält also Lichtquanten jeder Energie in einer relativen Häufigkeit, die sich aus dem PLANCKschen Strahlungsgesetz für diese Temperatur berechnen läßt, nur mit einer im Verhältnis $(3/15000)^4$, d.h. fast 10^{15}-fach geringeren Absoluthäufigkeit als im thermodynamischen Gleichgewicht.

Jedes Atom kann also, wenn es überhaupt von einem Lichtquant getroffen wird, in Zustände versetzt werden, für die bei thermischer Anregung Temperaturen von 15000° nötig wären. Der Begriff „Temperatur" verliert hier seinen landläufigen Sinn; man kann nicht mehr von *der* Temperatur im Raum oder in einem Nebel schlechthin sprechen. Temperatur ist für den Physiker nur ein bequemer Ausdruck für Energie ($E = \frac{3}{2} kT$, wo $k = 1{,}4 \cdot 10^{-23}$ erg/Grad die BOLTZMANNsche Konstante, E die Energie des Atoms und T die absolute Temperatur ist). In diesem erweiterten Sinn ist dann auch für den Astronomen die Temperatur eine der Größen, die den Zustand der Materie in den hochgradig verdünnten kosmischen Plasmen kennzeichnen.

Wir wollen an einigen Beispielen die Verhältnisse erläutern und durch ein paar Zahlen den Vergleich herstellen mit den bisher betrachteten Zuständen.

a) Bei den *Planetarischen Nebeln* beobachten wir eine in Expansion begriffene Gashülle, in deren Spektrum neben den Emissionslinien von H, He I und He II vor allem gewisse „verbotene" Linien des O II, O III und N II auftreten. Die Anregung des Nebelleuchtens erfolgt durch die intensive UV-Strahlung eines Zentralsternes, dessen hohe effektive Temperatur schon aus seinem Spektrum gefolgert, aus der Theorie des Anregungsmechanismus genauer berechnet werden kann. Für die Temperaturen der Zentralsterne ergeben die neuesten Untersuchungen Werte über 100000°.

Die Zusammensetzung der Nebelmaterie stimmt weitgehend überein mit der der normalen Sternmaterie, d.h. überwiegender Anteil von H und He, der Rest in der Hauptsache C, N, O, Ne. Die „Temperatur" der durch die Ionisationsprozesse gebildeten freien Elektronen liegt in der Gegend von 30000° und darüber. Die mittlere Dichte ist von der Größenordnung 10^{-22} g/cm³, entsprechend etwa 100 Teilchen je cm³. Daraus ergeben sich mittlere freie Weglängen der Teilchen von der Größenordnung der Distanz Erde—Sonne und mittlere Laufzeiten eines Teilchens zwischen zwei Zusammenstößen mit anderen Teilchen von der Größenordnung 10^7 sec oder 100 Tagen.

Die außerordentliche Verdünnung der anregenden Strahlung hat zur Folge, daß die Begegnungen eines Atoms mit einem Lichtquant noch hundertfach seltener sind als die mit einem anderen Atom oder einem Elektron. Ein Atom in einem planetarischen Nebel hat also vielleicht nur alle 100 Jahre einmal eine Chance, ein Lichtquant zu absorbieren. Gelingt ihm das aber, dann steht ihm auch hinreichend Zeit zur Verfügung, um die damit aufgenommene Energie in beliebiger Form auszustrahlen („verbotene" Linien), ohne daß es durch Zusammenstoß mit einem anderen Teilchen gezwungen wird, die Energie vorzeitig mit diesem Teilchen auszutauschen.

b) Das Plasma der *Korona der Sonne* — auch die anderen Sterne werden solche Strahlenkränze haben — ist gekennzeichnet durch eine Elektronentemperatur von einigen Millionen Grad, die aus dem Vorhandensein von Ionen des Ca, Fe und Ni in 11- bis 14fachen Ionisationsstufen (Ionisationspotentiale bis über 800 V) und aus der Breite der von diesen Ionen emittierten Linien gefolgert werden muß, und eine Dichte der Elektronen, die von 10^8 cm^{-3} am Sonnenrand auf 10^6 in einem Sonnenradius Abstand abnimmt. Es besteht kaum ein Zweifel darüber, daß auch in der Korona H und He in der gleichen relativen Häufigkeit wie sonst in der Sonnenmaterie vertreten sind, obwohl das Spektrum durch die Linien der hochionisierten Metalle beherrscht wird, die höchstwahrscheinlich von verdampften Meteoriten aus dem interplanetaren Raum herrühren.

Die Verhältnisse in der Korona werden mitbestimmt durch magnetische Vorgänge auf der Sonne; die Strahlenstruktur der äußeren Korona und die mannigfachen solar-terrestrischen Beziehungen sind Belege dafür.

c) Das *interstellare Medium* tritt gegenüber den Beobachtungen in sehr wechselvoller Gestalt auf. Ihm können zugeordnet werden: die ausgedehnten chaotischen Gasnebelmassen vom Typus des Orionnebels, deren physikalische Zustände aufs engste verwandt sind mit denen in den Planetarischen Nebeln (Anregung durch kurzwellige Sternstrahlung); die „Dunkelnebel", die sich durch teilweise Absorption und Verfärbung des sie durchsetzenden Sternenlichtes bemerkbar machen, von denen aber auch größere Teile als „Reflexionsnebel" im reflektierten Licht benachbarter bzw. in sie eingebetteter Sterne leuchten (Cirrusnebel im Schwan); die mehr oder weniger ausgedehnten Gebiete der Milchstraße, die ganz schwach im Lichte der Wasserstofflinien leuchten und als „Rotnebel" photographiert werden können, und schließlich die Träger der interstellaren Linienabsorption, Atome und Ionen des Na, K, Ca II und Ti sowie Molekeln wie CH, CN und NaH.

Es scheint ziemlich sicher, daß die interstellare Materie hauptsächlich in Form von lokalen Ansammlungen, „Wolken", auftritt, und es ist eine noch offene Frage, ob es darüber hinaus ein über das ganze Milchstraßensystem gleichförmig verteiltes Substrat gibt. Die andere Frage, ob die genannten, zunächst rein phänomenologisch unterschiedenen Erscheinungsformen der interstellaren Materie auch räumlich getrennte Objekte sind oder ob interstellares Gas und kosmischer Staub in den gleichen Wolken vertreten sind, darf heute vielleicht dahin beantwortet werden, daß die Zusammensetzung der interstellaren Materie im großen Durchschnitt überall die gleiche ist, daß aber infolge der ständigen Wechselwirkung zwischen Gas und festen Partikeln einerseits, dem gegenseitigen Austausch von Materie und Energie zwischen den Sternen und dem interstellaren Medium andererseits lokale Verschiebungen des Gleichgewichts zwischen Gas und festen Partikeln stattfinden, die vielleicht so weit gehen können, daß sich auf der einen Seite aus interstellaren Wolken Sterne bilden (Deutung der „Globulen"), während auf der anderen Seite das interstellare Medium sich aus der von Sternen abgestoßenen Materie (Nova-Ausbrüche!) regeneriert.

Die Dichte der interstellaren Materie liegt zwischen 10^{-23} und 10^{-25} g/cm³; es trifft also durchschnittlich ein Proton auf den Kubikzentimeter. Das Verhältnis des Wasserstoffs zu den übrigen Elementen ist das gleiche wie in den Sternen. Die „Temperatur" (jetzt gaskinetisch gemeint) kann örtlich recht verschiedene Werte annehmen, und entsprechend verschieden ist der Ionisationsgrad und der relative Anteil freier Elektronen. Wir finden Gebiete, in denen der Wasserstoff infolge der niedrigen Temperatur überhaupt nicht ionisiert ist und daher fast keine freien Elektronen vorhanden sind, und andere, in denen fast aller Wasserstoff ionisiert ist und freie Elektronen in gleicher Häufigkeit wie die Protonen auftreten.

Wenden wir uns nun der anderen Seite dessen zu, was die Welt erfüllt, der *Energie in ihren verschiedenen Erscheinungsformen*, so begegnet uns als astronomisch am bedeutungsvollsten zunächst die *Strahlungsenergie*, die von den verschiedenen kosmischen Objekten, in erster Linie den Sternen, ausgesandt wird und im interstellaren Raum ein Strahlungsfeld erzeugt, dessen Energiedichte zu etwa 10^{-12} erg/cm³ abgeschätzt werden kann. Das entspricht, mit dem Energieäquivalent der Masse, $1\ \mathrm{g} = 9 \cdot 10^{20}$ erg, umgerechnet, einer Massendichte von 10^{-33} g/cm³. Verglichen mit der Dichte der Materie, die bei gleichförmiger Verteilung der Masse des Milchstraßensystems auf den ganzen von ihm eingenommenen Raum 10^{-23} bis 10^{-24} g/cm³ betrüge, ist also die Dichte der Strahlung 10^9mal geringer.

Beachtet man, daß die Frequenzen dieser Strahlung, die in grober Näherung durch eine PLANCKsche Verteilung für eine Temperatur von 15000° wiedergegeben werden kann, zwischen 10^{16} und 10^{13} sec^{-1} liegen und daß die in maximaler Häufigkeit vorhandenen Strahlungsquanten der Frequenzen 10^{15} sec^{-1} Energien von 10^{-11} erg oder 10^{-32} g entsprechen, dann kann die Energiedichte auch als Teilchendichte von 10^{-1} cm^{-3} beschrieben werden. Es kommt also im Durchschnitt auf 10 materielle Teilchen ein Strahlungsquant.

Erhebliche Mengen von Strahlungsenergie stecken im Innern der Sterne selbst, wo wegen der hohen Temperatur die Energiedichte etwa 10^{27}mal größer ist als im interstellaren Raum und die energiereichen Quanten aus dem Bereich der kurzwelligsten Röntgenstrahlung (Frequenzen von 10^{18} sec^{-1}, entsprechend 10^{-8}erg) an Zahl bei weitem überwiegen. Das Verhältnis der Strahlungsenergiedichte zur Dichte der Materie ergibt sich daraus zu 10^{-6}; selbst die im Innern der Sterne vorhandene Strahlungsenergie ist also vernachlässigbar klein gegenüber der Masse des Sterns. Das Verhältnis der Teilchenzahlen ist das gleiche wie im interstellaren Raum.

Von gleicher Größenordnung wie die Strahlungsenergie sind die Energiebeträge, d e als Anregung und Ionisation und als kinetische Energie der Atome in den Sternen und dem interstellaren Medium vorhanden sind.

Etwas anders dagegen liegen die Verhältnisse bei der *kosmischen Strahlung*, die offenbar primär aus schnellbewegten Protonen besteht, mit Geschwindigkeiten, die die Lichtgeschwindigkeit fast erreichen, im ganzen aber ein sehr komplexes und noch nicht ganz überschaubares Phänomen ist, dessen Deutung in engem Zusammenhang steht mit den Fragen nach dem Wesen der Materie überhaupt und den möglichen wechselseitigen Umwandlungen von Materie und Energie. Wir beobachten in der kosmischen Strahlung Teilchen mit Energien bis zu 10^4 erg, das ist das Billionenfache der mittleren Energie der Strahlungsquanten im Innern der Sterne; aber wir können noch keine zuverlässigen Angaben machen über die Zahl solcher Teilchen in der Raumeinheit oder gar im ganzen Milchstraßensystem. Vorsichtige Schätzungen gehen dahin, daß die räumliche Energiedichte der kosmischen Strahlung möglicherweise einige Zehnerpotenzen größer ist als die der Temperaturstrahlung, daß aber ihr Verhältnis zur mittleren Dichte der Materie immer noch durch eine Zahl der Größenordnung 10^{-4} bis 10^{-3} beschrieben wird.

Schließlich stecken in den Atomen selbst noch Energien, die bei Kernumwandlungen frei gemacht werden können. Diese *inneratomaren Energien* sind aller Wahrscheinlichkeit nach die wesentliche Quelle der Strahlungsenergien, die wir beobachten. Die relative energetische Ausbeute der Kernprozesse ist am größten bei der Vereinigung von vier Protonen und zwei Elektronen zu einem Heliumkern, wo fast 8 TME je Proton gewonnen werden. Da Wasserstoff den Hauptanteil an der Zusammensetzung der Materie hat, bestimmt er die obere Grenze für die Energie, die in der Möglichkeit der Materie zur Bildung schwererer Atomkerne steckt; diese obere Grenze liegt unter 1% der Masse und ist vergleichbar in der Größenordnung mit der Energie der kosmischen Strahlung.

Betrachten wir die Welt als Ganzes, dann spielen zwei Formen der Energie eine Rolle, die allein den Vergleich mit der Ruheenergie der Materie bestehen können. Es ist dies einmal *die potentielle Energie der Gravitation*, bestimmt durch die Verteilung der Massen im Raum, zum andern *die kinetische Energie der Expansionsbewegung*, bestimmt durch Masse und Geschwindigkeit der an der allgemeinen Expansion teilhabenden Sternsysteme. Die Berechnung dieser Energien und ihr Vergleich mit dem materiellen Inhalt der Welt sind gebunden an das spezielle Modell, das wir für den Aufbau der Welt annehmen. Wenn wir uns zunächst beschränken auf den Raum, in dem wir heute einigermaßen die Verhältnisse zu überschauen glauben, dann können wir eine Kugel von etwa 200 Millionen Lichtjahren Radius ($2 \cdot 10^{26}$ cm, entsprechend einer „Nebelflucht"-Geschwindigkeit von $^1/_8$ Lichtgeschwindigkeit) den Berechnungen zugrunde legen und erhalten folgende Zahlen:

Mittlere Massendichte	10^{-28} g/cm³,
Gesamtmasse	$3 \cdot 10^{51}$ g,
Potentielle Energie der Gravitation	$2 \cdot 10^{48}$ g,
Kinetische Energie der Expansion	$15 \cdot 10^{48}$ g.

Die Gravitationsenergie erreicht also noch nicht $^1/_{1000}$ der Masse, die Expansionsenergie ein halbes Hundertstel. Wollten wir von hier aus aber extrapolieren auf die ganze Welt mit einem „Radius" von $1{,}6 \cdot 10^{27}$ cm unter Beibehaltung der Massendichte 10^{-28} g/cm³, dann verschieben sich, da die Masse mit der dritten Potenz des Radius wächst, Gravitations- und kinetische Energie mit der fünften, die Verhältnisse stark in dem Sinn, daß der Energieinhalt der Welt im Verhältnis zum materiellen Inhalt wächst. Die zu vergleichenden Zahlen wären dann, in Einheiten von 10^{75} erg oder 10^{54} g ausgedrückt, 2,0, 0,1 und 0,6, also von vergleichbarer Größenordnung.

In eine Gesamtenergiebilanz geht die potentielle Energie mit negativem Vorzeichen ein; diese Bilanz würde mit den vorliegenden Zahlen also positiv abschließen in dem Sinn, daß Materie und kinetische Energie zusammen mit $2{,}6 \cdot 10^{54}$ g einer Gravitationsenergie von $0{,}1 \cdot 10^{54}$ g gegenüberstehen. Eine Erhöhung der mittleren Massendichte auf den Wert $3 \cdot 10^{-27}$ g/cm³ würde die negative potentielle Energie gegenüber der kinetischen Energie und der Masse so erhöhen, daß beide sich gerade aufhöben. Wir kämen dann zu dem Schluß, den JORDAN als verlockende Hypothese an die Spitze seiner kosmologischen Betrachtungen gestellt hat: Die Gesamtenergie der Welt ist Null.

Bei aller nach den Ausführungen von Herrn HECKMANN über die zulässigen Weltmodelle gebührenden Vorsicht gegenüber solchen Extrapolationen darf gesagt werden, daß nach den innerhalb des gegenwärtigen Beobachtungsbereiches gewonnenen Erkenntnissen eine mittlere Massendichte der Größenordnung 10^{-27} g/cm³ zwar nicht ausgeschlossen werden kann, daß jedoch der wahrscheinlichste Wert eher zwischen 10^{-28} und 10^{-29} liegt als darüber. Dann aber überwiegt der Anteil der Masse und wir können so formulieren:

Der Inhalt der Welt in ihrem gegenwärtigen Zustand ist zum größeren Teil „materialisiert" in Form von Nukleonen (Protonen und Neutronen). Die Gesamtzahl der in der Welt vorhandenen Nukleonen ist von der Größenordnung 10^{79}. Nur die kinetische Energie der

Expansionsbewegung ist von vergleichbarer Größenordnung mit der Ruheenergie der Masse, während alle anderen Energieformen gegenüber der Masse verschwinden. Die Materie selbst ist weitaus überwiegend in Form der leichtesten Kerne H und He vorhanden, höchstens 3 bis 4% aller Nukleonen sind zu schwereren Kernen zusammengefügt. Ein nicht unerheblicher Teil der Materie (er kann ein Zehntel erreichen) ist in entartetem Zustand vorhanden (weiße Zwerge).

Wie hoch der Anteil höher organisierter Formen der Materie (Molekeln, Körper der anorganischen und der organischen Welt) ist, könnte man versuchen, ebenfalls in Zehnerpotenzen auszudrücken. Man könnte vielleicht auch in Zahlen angeben, welcher Bruchteil der gesamten materiellen Welt die uns als höchste Stufe der Organisation erscheinende Form des menschlichen Gehirns erreicht hat, und könnte daraus Schlüsse ziehen über die Stellung des Menschen in der Welt. Ob wir damit aber in irgendeiner Weise etwas von dem erfassen würden, was das Wesen menschlichen Denkens und Tuns ausmacht, wird man füglich bezweifeln dürfen. Hier enden die Möglichkeiten für den Naturwissenschaftler; das Wort haben die Philosophen und Theologen.

Sternwarte Heidelberg-Königstuhl.

Eingegangen am 11. Dezember 1950.

Kurze Originalmitteilungen.

Für die Kurzen Originalmitteilungen ist ausschließlich der Verfasser verantwortlich.

Quantitative Absorptionsuntersuchungen an der sichtbaren Bande der Brom- und Joddämpfe.

Die Deutungsversuche der Absorptionsbeobachtungen an der sichtbaren Bromdampfbande waren bisher noch unbefriedigend[1],[2]. Durch ausführliche Untersuchungen können jetzt die druckabhängigen Abweichungen der Absorptionsgesetze innerhalb dieser Bande quantitativ als Wirkung der veränderlichen Linienstruktur gedeutet werden.

Mit Hilfe einer Zwei-Zellen-Kompensationsmethode wurde das Absorptionsvermögen des Bromdampfes im Bereich der grünen Hg-Linie 5461 Å in einem Druckintervall von 3 mm Hg bis 2,5 at und mit Schichtdicken von 0,5 cm bis 1 m aufgenommen. In diesem Bereich finden wir sowohl mit dem Druck abnehmende und zunehmende als auch konstante Werte des scheinbaren Extinktionskoeffizienten. Die scheinbar widerspruchsvollen bisherigen Literaturangaben[1]) beruhen somit nicht auf Meßfehlern, sondern entsprechen tatsächlichen Beobachtungen.

Ferner wurde auch das Absorptionsvermögen des Joddampfes bei 5461 Å in der gleichen Anordnung untersucht. Hier sind schon bei konstanter Schichtdicke und verschiedenen Drucken positive und negative Abweichungen vom LAMBERTschen Gesetz zu beobachten. Auch hier können durch genaue Messungen in einem großen Druckbereich die bisher bekannten und sich scheinbar widersprechenden Messungen verständlich gemacht werden.

Indem die Änderung der Absorption beobachtet wird, wenn die spektrale Verteilung der Lichtquelle durch ein „Vorfilter" aus Bromdampf geändert war, kann gezeigt werden, daß die Linienstruktur des Spektrums die Abweichungen von den Absorptionsgesetzen verursacht. Halogendampf unter hohem Druck sowie Halogenlösungen hatten keinerlei „Vorfilterwirkung". Dieses „Vorfilterverfahren" ist somit zur quantitativen Untersuchung von Spektren mit Linienstruktur besonders geeignet.

Zur quantitativen Deutung wurde das von E. M. ELSASSER[3]) für die Gesamtabsorption überlappender Spektrallinien angegebene Integral

$$\frac{I}{I_0} = \int\limits_{\frac{SNz}{d}}^{\infty} e^{-A\,\mathfrak{Ctg}\,2\beta}\, J_0\left(\frac{iA}{\mathfrak{Sin}\,2\beta}\right) dA \qquad (1)$$

ausgewertet. Die Bedeutung der einzelnen Buchstaben ist folgende:

I = Lichtintensität nach dem Durchgang durch die Schichtdicke z,
I_0 = Anfangsintensität,
N = Zahl der Molekeln,
ν' = Halbwertsbreite,
$S = \int \varepsilon_\nu \, d\nu$,
$A = \frac{SNz}{d}$,
J_0 = BESSEL-Funktion nullter Ordnung,
d = Abstand zweier Absorptionslinien,
$\beta = \frac{\pi \cdot \nu'}{2d}$.

Die mittels graphischer Integration und Reihenentwicklungen durchgeführte Auswertung von (1) dürfte zur Klärung von Absorptionsbeobachtungen von allgemeinem Interesse sein. — Wenn die Linienbreite der Jod- und Bromlinien als lineare Funktion des Druckes angenommen wird, so können wir die Mannigfaltigkeit unserer Meßkurven von reinem J_2 und von J_2—N_2-Mischungen innerhalb der Fehlergrenze von 1 bis 2% mit der Gl. (1) quantitativ deuten. Das gleiche gilt auch für die Brommessungen bei nicht zu kleinen Drucken. Die mittlere Oszillatorenstärke innerhalb der grünen Hg-Linie können wir bei Joddampf zu $f = 7{,}45 \cdot 10^{-7}$ und bei Bromdampf zu $5{,}2 \cdot 10^{-8}$ angeben.

Mit der Genauigkeit der Methode können wir das Verhältnis der optischen Wirkungsdurchmesser von J_2—J_2 zu J_2—N_2-Begegnungen mit 1,37 angeben. (Die gaskinetischen Durchmesser bei J_2—J_2-Stößen sind 1,3mal so groß wie bei J_2—N_2-Stößen). Die Absolutwerte der berechneten optischen Wirkungsdurchmesser sind um Faktoren von 1,3 bis 1,8 gegenüber den gaskinetischen Werten erhöht.

Die Abweichungen vom BEERschen Gesetz können hier mit der einfachen Stoßtheorie gedeutet werden. Die bei hohen Drucken gefundene Gültigkeit des LAMBERTschen Gesetzes kann durch den Übergang der Rotationsstruktur in ein kontinuierliches Spektrum gedeutet werden. Dieser Übergang kann noch mit Gl. (1) und den Ergebnissen der einfachen Stoßtheorie erfaßt werden.

Eine ausführliche Veröffentlichung der Ergebnisse folgt in Kürze an anderer Stelle.

Physikalisch-Chemisches Institut der Universität Tübingen.
G. KORTÜM und W. LUCK.

Eingegangen am 13. Januar 1951.

[1]) KORTÜM, G., u. D. MÜLLER: Z. Naturforschg. 1, 439 (1946).
[2]) KORTÜM, G., u. D. MÜLLER: Z. Naturforschg. 1, 637 (1946).
[3]) ELSASSER, E. M.: Phys. Rev. 54, 126 (1938).

Die Brunstzeit (breeding season) bei Schafen in Beziehung zur Tageslänge in nördlicher und südlicher Breite.

Das Klima bildet den wesentlichsten Begrenzungsfaktor der gesamten Schafhaltung der Welt. Die schafreichsten Gebiete werden innerhalb enger Grenzen der Temperatur und der Niederschlagsmenge gefunden, gegen die die Tiere während ihrer Brunst- und Lammzeit besonders empfindlich sind. Neueste Forschungen haben gezeigt, daß das Tageslicht einen erheblichen Einfluß auf die Brunstzeit des Schafes ausübt. Wie der jahreszeitliche Wechsel der Tageslänge mit der geographischen Breite differiert, ist auch die Brunstzeit eine verschiedene. Während sie an den Polen äußerst kurz ist, bedingt durch die Schwankungen der Tageslänge, ist sie am Äquator kontinuierlich, da die Tageslänge das ganze Jahr über gleichbleibend 12 Std beträgt; obgleich zwei Höhepunkte der Geschlechtstätigkeit wahrzunehmen sind, die mit der Zeit, in der die Sonne im Zenit steht, zusammenfallen.

Bringt man Schafe von einem Breitengrad zu einem anderen, so wird die Tätigkeit des Eierstockes beeinflußt[1]), gemäß der Tageslänge des neuen Ortes und der Jahreszeit, in welcher der Wechsel stattfindet. Einige Rassen (Ramanov, Rambouillet u. a.) werden zwar das ganze Jahr über brünstig und bringen jährlich zwei Lämmer, sogar in hohen Breiten, wie z. B. Rußland. Doch im allgemeinen ist die Brunstzeit bei Schafen gleichmäßig um den kürzesten Tag verteilt[2]), mit geringen Ausnahmen wie unter anderen die Dorset-Horn-Rasse.

Die Brunsterscheinungen von Schafen sind in Cambridge unter Beobachtung gewesen, als nichttragende Muttertiere zusammen mit sterilen Böcken ganzjährig auf der Weide gehalten wurden. Die Brustseite der Böcke war mit Farbe gekennzeichnet, die 14tägig gewechselt wurde; die Böcke markierten dadurch die weiblichen Tiere jedesmal, wenn sie brünstig waren.

Fig. 1A veranschaulicht die Brunstzeit der Border-Leicester-Rasse in Cambridge. Die Tätigkeit der Eierstöcke wird durch die Anzahl der wirklich eingetretenen Brunstzyklen in Prozenten der monatlich theoretisch möglichen dargestellt (die durchschnittliche Zykluslänge beträgt 17 Tage; danach wird erwartet, daß jedes Muttertier monatlich 30/17 = 1,8 Brunstzyklen und eine Herde von 10 Muttertieren demzufolge

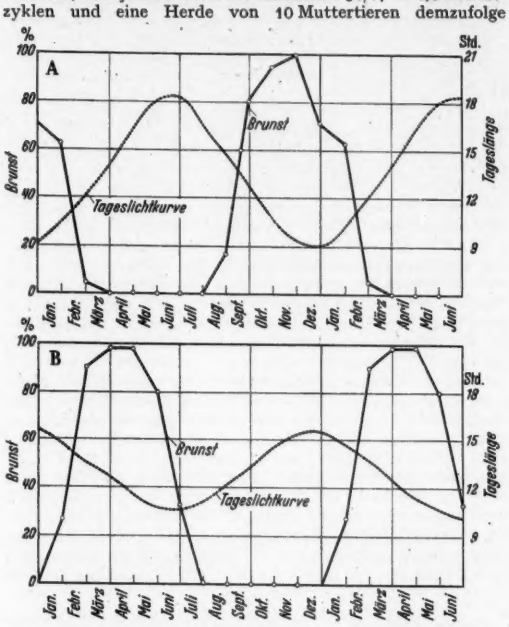

Fig. 1A u. B. Die Geschlechtstätigkeit bei Schafen in Abhängigkeit von der Tageslänge. A In 52° nördlicher Breite. B In 33° südlicher Breite. Ordinate für die ausgezogene Kurve (links): Zahl der brünstigen Muttertiere in Prozenten der theoretisch zu erwartenden Zahl. Ordinate für die gestrichelte Kurve (rechts): Tageslänge in Stunden.

10 × 1,8 = 18 theoretische Brunstzyklen hätte). Die Tageslichtkurve verkörpert den jahreszeitlichen Wechsel der Tageslänge in Cambridge (52° N), der nach den Tageslichttabellen im Nautical Almanac 1949 berechnet wurde. Es zeigt sich, daß der Höchstwert der Geschlechtstätigkeit mit den kürzesten Tagen zusammenfällt (der kürzeste Tag der nördlichen Halbkugel ist der 21. Dezember).

Fig. 1B stellt die Brunstzeit derselben Rasse in der McMaster Field Station, New South Wales, Australien (33° S)[3]) dar: dieses Kurvenbild zeigt ebenfalls, daß der Gipfelwert der Geschlechtstätigkeit auch wieder in die Zeit der kürzesten Tage zusammenfällt (der kürzeste Tag der südlichen Halbkugel ist der 21. Juni). In Fig. 1B ist jedoch die Beziehung zwischen der Kurve der Geschlechtstätigkeit und der Tageslichtkurve nicht so scharf, da Australien nahe der Äquatorzone liegt, wo der jahreszeitliche Wechsel der Tageslänge unerheblich ist. Erbanlagen spielen ebenfalls eine Rolle bei der Modifikation dieser Beziehung. Es wird vermutet, daß kurze Tage allgemein die Tätigkeit der für die Funktion der Eierstöcke wichtigen Hypophyse begünstigen.

Diese Forschungen sind in der Animal Research Station in Cambridge ausgeführt worden, und mein Dank gebührt Dr. John Hammond, C. B. E., F. R. S. für seinen ständigen Rat.

School of Agriculture Cambridge University, England.

E. S. E. Hafez.

Eingegangen am 29. November 1950.

[1]) Hafez, E. S. E.: Nature (Lond.) **166**, 822 (1950).
[2]) Hammond, J., jr.: J. agricult. Sci. **34**, 97 (1944).
[3]) Kelley, R. B., and H. E. B. Shaw: Coun. Sci. Ind. Res. (Aust.) Bull. **1943**, 166.

Heteroplastische Transplantationen bei Holzpflanzen.

Im Frühjahr und Sommer 1949 wurden mit Erfolg bei Sämlingspflanzen folgende Pfropfungen ausgeführt: Fichte auf Kiefer, Kiefer auf Fichte, Kiefer auf Lärche (Fig. 1). Der Jahrestrieb der aufgepfropften Art im folgenden Jahr 1950 war völlig normal, zum Teil sogar besonders kräftig.

Die gleichen Pfropfungen gelangen auch im Frühjahr 1950; ferner die folgenden:

Fichte auf *Larix europaea, Abies spec., Pseudotsuga* und *Pinus montana*; alle auch umgekehrt.

Kiefer auf *Abies spec.* und *Pseudotsuga*; alle auch umgekehrt.

Pinus montana auf *Larix europaea, Abies spec.* und *Pseudotsuga*; alle auch umgekehrt.

In allen diesen Fällen ist Verwachsung erfolgt; das weitere Verhalten wird sich ergeben.

Bei den Fagaceen sind schon die meisten Pfropfungen innerhalb einer Art schwierig. Es ließen sich indessen mit Erfolg pfropfen *Fagus silvatica* und *Castanea vesca* auf *Quercus sessiliflora*. Innerhalb der Gattungen *Fagus, Quercus* und *Castanea* gelangen zahlreiche Pfropfungen, die zum Teil schon im zweiten Jahre gut weiterwachsen. *Halimodendron argenteum* (Pap.) zeigte auf *Caragana arborescens* die 3- bis 5fache Wachstumsintensität als auf eigener Wurzel.

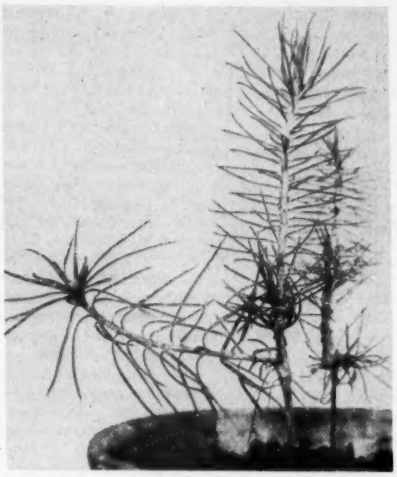

Fig. 1 Picea excelsa (aufrechter Trieb) im Mai 1949 auf Pinus silvestris gepfropft. Photo September 1949.

Chlorophyllfreie Sämlinge von *Citrus trifoliata*, die sonst nach wenigen Wochen absterben, ließen sich durch Ablaktierung mit normal grünen vereinigen. Sie starben zwar auch dann von oben her ab, trieben aber in der Gegend der Verwachsungsstelle Triebe, die nun normal grün waren.

Die Versuche, die auch im Zusammenhang mit der Forstpflanzenzucht und mit jüngst vorgetragenen neuen Theorien über gegenseitige Beeinflussung von Pfropfpartnern von Interesse werden können, werden fortgesetzt.

Forstbotanisches Institut der Universität Göttingen.

S. Herrmann.

Eingegangen am 13. Januar 1951.

Eine Spinne als Glazialrelikt.

Im August 1950 fing ich auf dem Meißner bei Kassel in etwa 680 m Höhe eine Wolfspinne, ein Männchen vor der Reifehäutung. Die Bestimmung, die in diesem Zustande nur bis zur Gattung gehen konnte, ergab *Acantholycosa*. Diese Gattung war von mir noch nicht beobachtet, und so wurde das Tier in einem Glase bis zur Reifehäutung, die im November stattfand, gefüttert. Die Bestimmung ergab nun *Acantholycosa norvegica* Thorell, eine für Deutschland neue Spinnenart. Bisher waren von dieser Gattung drei Arten in Deutschland bekannt, die alle in großen Höhen gefunden wurden: *A. lignaria* Clerk im Böhmerwald und in den Voralpen, *A. rupicola* Dufour in den Voralpen und *A. sudetica* L. Koch im Riesengebirge. Die nächsten bekannten Fundorte von

A. norvegica sind in Schweden und Lappland, alle nördlich des Polarkreises. Es ist zwar bekannt, daß Jungspinnen mit Fäden als „Altweibersommer" große Entfernungen überbrücken können; es erscheint aber unmöglich, daß dieses Tier 2000 km auf solche Weise überwunden hat. *A. norvegica* hat in den Geschlechtsorganen große Ähnlichkeit mit *A. sudetica*, so daß die Frage offen ist, ob nicht beide Spinnen als Rassen der gleichen Art angehören. Doch hat *sudetica* nach der Beschreibung von DAHL eine fast schwarze Körperfarbe, was auf das gefundene Männchen durchaus nicht zutrifft. Zudem stimmt eine Abbildung der Spinne in Å. HOLM, Svensk Spindelfauna 3 vollkommen mit der gefundenen Art überein. So bleibt nur die Annahme, daß *A. norvegica* ein Glazialrelikt auf dem Meißner ist, der nun zu seinen botanischen Besonderheiten noch eine zoologische bekommen hat.

Göttingen.

HEINRICH HOMANN.

Eingegangen am 18. Januar 1951.

Ein neues Kapillarviskosimeter für hohe Drucke.

In einer früheren Arbeit[1]) wurde ein Fallkörperviskosimeter für 2000 Atm. beschrieben. Bei Verwendung von Glaskugeln können mit ihm Flüssigkeitsviskositäten bis zu 0,5 cPs herab gemessen werden. In der vorliegenden Arbeit soll ein Kapillarviskosimeter für hohe Drucke beschrieben werden, mit dem darüber hinaus auch die um zwei weitere Zehnerpotenzen kleineren Gasviskositäten bestimmt werden können. Mit Hilfe dieses Viskosimeters soll die Theorie von ENSKOG[2]), die den gesamten Dichtebereich vom idealen Gas bis zur hochverdichteten Flüssigkeit überstreicht und die in Spezialfällen zu Rückschlüssen über Flüssigkeitsstrukturen verwandt wird[3]), experimentell kontrolliert werden.

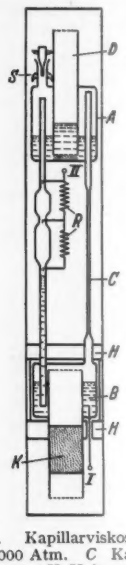

Fig. 1. Kapillarviskosimeter für 2000 Atm. *C* Kapillare 0,1 mm ⌀; *H* Halterung des Einsatzes; *R* Hochohmwiderstände; *S* Einfüllstutzen.

Über die Viskosität eines hochkomprimierten Gases liegt bisher nur eine Untersuchung — die Präzisionsmessung von MICHELS und GIBSON[4]) an Stickstoff bis 1000 Atm. — vor. Auch sie wurde nach der Kapillarmethode durchgeführt, die gegenüber dem Fallkörperprinzip den Vorteil der größeren Empfindlichkeit, der geringeren Raumbeanspruchung und einer geringeren Druck- und Temperaturabhängigkeit der Apparatekonstante mit sich bringt.

Die Kapillarmethode wurde trotzdem für Messungen unter Druck nur sehr selten verwandt[5]). Der Grund liegt in großen meßtechnischen Schwierigkeiten, die hauptsächlich bei dem Wiederhochholen der Substanz nach erfolgtem Durchfluß und bei Registrierung des Durchflusses auftreten. MICHELS und GIBSON können die Messung — im Gegensatz zu anderen Autoren — beliebig oft wiederholen, müssen hierzu jedoch jedesmal eine kleine Menge Quecksilber in das Druckrohr pumpen, wodurch der Druck etwas geändert wird. Auch funktioniert das Verfahren nur bei großer Kompressibilität der Untersuchungssubstanz, so daß Flüssigkeiten auf diese Weise nicht untersucht werden können.

Das neue Meßverfahren. Der in Fig. 1 dargestellte Glaseinsatz kann auswechselbar in vorhandene Druckrohre eingesetzt werden und steht dann unter allseitigem Druck. Er besitzt einen gut eingeschliffenen, mechanisch oder elektromagnetisch bewegten Kolben *K*, der beim Hochdrücken die innen befindliche Untersuchungssubstanz vor sich hertreibt. Die Substanz erfährt dabei an dem mit Kapillare *C* versehenen Schenkel einen derart großen Strömungswiderstand, daß das schraffiert gezeichnete Quecksilber in dem zweiten Schenkel bis zum obersten Platinkontakt II hochgedrückt wird.

Bleibt der Kolben jetzt in der oberen Stellung stehen, so gleicht sich die eben im Quecksilber entstandene Niveaudifferenz aus. Die beiden Schenkel stellen dabei mit den beiden oben und unten befindlichen Hg-Behältern *A* und *B* ein Ringsystem dar, in dem die Substanz umläuft. Der Durchlauf wird elektrisch durch die eingebauten Platinkontakte registriert, wobei das obere, bei II befindliche Gefäß zur Überwachung des Anlaufes und das darunter liegende, etwa 3 cm³ fassende Gefäß zur eigentlichen Bestimmung der Viskosität dient.

Zur Wiederholung des Meßvorganges wird der Kolben *K* nach unten gezogen und danach erneut wieder hochgedrückt. Da sich der Kolben *K* selbst ebenfalls im Druckrohr befindet, tritt bei seiner Verschiebung keine Druckänderung auf. Bei seiner Verschiebung ändern sich lediglich die Quecksilberniveaus im Behälter *A*, die gleichzeitig dazu dienen, den Druck von dem außen befindlichen Kompressorenöl *D* auf die Substanz zu übertragen.

Beim Einsetzen des Glaseinsatzes in das Druckrohr wird der obere Kontakt II über eine Calitdurchführung isoliert aus der Druckapparatur herausgeführt, während Kontakt I mit dem Gehäuse verbunden wird. Beim Absinken des Hg-Niveaus werden die einzelnen Platinkontakte freigegeben und die Hochohmwiderstände *R* eingeschaltet, wodurch in einem äußeren Stromkreis stufenweise die Stromstärke geändert wird.

Da die Methode unabhängig von der Kompressibilität der Untersuchungssubstanz ist, wurde ein Satz von zehn Viskosimetereinsätzen hergestellt, mit dem Messungen von der denkbar kleinsten Viskosität (Wasserstoff) bis zu extrem hohen Viskositäten von Ölen durchgeführt werden konnten.

Bei Gasmessungen ist der Druckbereich mangels eines geeigneten Kompressors zur Zeit noch auf 600 Atm. beschränkt, doch ist das Meßverfahren zweifellos auch bei höheren Drucken anwendbar. Die Reproduzierbarkeit ist außerordentlich gut, wie die folgenden wahllos herausgegriffenen Stoppungen an Methan zeigen:

(25° C)	25 Atm.	84,0	84,0	84,1	84,1	84,1 sec,
	298 Atm.	175,4	175,2	175,2	175,3	175,2 sec.

Die genaueren Meßresultate und Einzelheiten über die Interpretation der Theorie von ENSKOG sollen an anderer Stelle veröffentlicht werden. Das Endergebnis läßt sich in folgenden Punkten zusammenfassen:

1. Sämtliche Methanisothermen schneiden sich im Druck-Viskosität-Diagramm bei etwa 210 Atm.; d. h., unterhalb dieses Druckes steigt die Viskosität bei konstant gehaltenem Druck mit der Temperatur wie bei einem idealen Gas, während oberhalb von 210 Atm. die Viskosität wie bei einer Flüssigkeit mit der Temperatur abnimmt.

2. Der Schnittpunkt verschwindet bei Darstellung der Viskosität als Funktion der Dichte. Die Temperaturabhängigkeit ist bei hohen Drucken nicht echt, sondern sekundär durch die Dichteänderung mit der Temperatur hervorgerufen.

3. Entsprechend den Voraussagen der ENSKOGschen Theorie durchläuft die *kinematische* Viskosität als Funktion der Dichte ein Minimum.

4. Auf Grund der Theorie ergibt sich aus dem Minimum der Durchmesser der Methanmolekel. Er steht mit den nach anderen Methoden erhaltenen Literaturwerten in guter Übereinstimmung.

Herrn Prof. Dr. OTTO BAYER und dem Bayerwerk Leverkusen bin ich für die finanzielle Unterstützung dieser Arbeit zu großem Dank verpflichtet.

Physikalisches Institut der Bergakademie Clausthal.

E. KUSS.

Eingegangen am 5. Dezember 1950.

[1]) KUSS, E.: Naturwiss. **33**, 312 (1946).
[2]) ENSKOG, D.: Sv. Vetensk. Hdl. **63**, Nr 4 (1922).
[3]) WIJK, VAN, u. SEEDER: Physica **4**, 1073 (1937); **6**, 129 (1939). WIJK, VAN, SEEDER, VAN DER VEEN u. BRINKMAN: Physica **7**, 45 (1940).
[4]) MICHELS, A., u. R. O. GIBSON: Proc. roy. Soc., Lond. A **134**, 288 (1932).
[5]) COHEN, B., u. H. R. BRUINS: Z. physik. Chem. **114**, 441 (1925). — HYDE, J. H.: Proc. roy. Soc., Lond. **97**, 240 (1920). — TIMMROTH, D. L.: J. phys. USSR. **2**, 419 (1940).

Besprechungen.

Madelung, E.: Die mathematischen Hilfsmittel des Physikers. (Die Grundlehren der mathematischen Wissenschaften in Einzeldarstellungen, Bd. IV.) Vierte, vermehrte und verbesserte Aufl. Berlin-Göttingen-Heidelberg: Springer 1950. 8°. XX, 531 S. u. 29 Abb. DMark 47.—; geb. DMark 49.70.

Nunmehr liegt in neuer Bearbeitung die 4. Aufl. der vielbenutzten und -geschätzten „Mathematischen Hilfsmittel des Physikers" vor. Schon die Erweiterung des Umfangs um 150 Seiten gegenüber der 3. Auflage zeigt das Bestreben des Verf., durch Hinzunahme neuer Abschnitte und durch Ergänzung schon vorhandener das Buch immer mehr den verschiedenartigen Bedürfnissen der rechnenden Physiker anzupassen. Als besonders erfreuliche Ergänzung in dieser Hinsicht erscheint die gründliche Überarbeitung und Erweiterung des Abschnittes IV B über spezielle Funktionen (mit ausführlicher Darstellung der hypergeometrischen Funktionen und deren Sonderfälle, wie etwa der zugeordneten Kugelfunktionen u. dgl.), ferner die breitere Behandlung der Gruppentheorie und ihrer Anwendungen im IX. Abschnitt und in zwei Anhängen (mit Einbeziehung der Systematik der Kristallklassen und der gruppentheoretischen Behandlung der Eigenwertaufspaltung bei Atomen in Störfeldern mit bestimmten Symmetrieverhältnissen) sowie die wesentliche Erweiterung der Abschnitte über Vektoranalysis und Wahrscheinlichkeitsrechnung. Von besonderem Interesse dürften für manche Physiker auch verschiedene Teile des neuaufgenommenen I. Abschnittes sein, wie etwa der über die mehrdimensionalen Zahlen (hyperkomplexe Einheiten, CLIFFORDsche Zahlen u. a.) oder der über die Deltafunktionen.

Über diese speziellen Feststellungen hinaus darf aber vielleicht zum Buch im ganzen noch folgendes bemerkt werden: Seinerzeit entsprang dieses Buch einem vielfach als Mangel in der Fachliteratur empfundenen Bedürfnis und sah als seine Hauptaufgabe an, dem Leser eine möglichst vollständige Übersicht über das mathematische Rüstzeug und den grundlegenden Formelapparat der theoretischen Physik zu geben und so in kurzer (und vielleicht an manchen Stellen noch weiter kürzbarer) Zusammenstellung gleichsam das Handwerkzeug des rechnenden Physikers nebst Gebrauchsanleitung zu vermitteln. Daneben trat aber von Auflage zu Auflage immer deutlicher das Bestreben des Verf. hervor, außer dem mathematischen Apparat auch eine Übersicht über die begrifflichen Grundlagen der theoretischen Physik in möglichst prägnanter Form zu geben. Diese zweite Grundtendenz wird nun in einer Weise durchgeführt, über die man vielleicht mitunter verschiedener Meinung sein kann, die aber durchwegs die schöpferische Hand eines Meisters erkennen läßt. Freilich birgt diese kurze Behandlung der begrifflichen Grundlagen bis zu einem gewissen Maß auch eine Gefahr für den Studierenden in sich, der das Buch ohne die nötigen Vorkenntnisse in die Hand nimmt. Denn für ein wirkliches Verständnis der physikalischen Erscheinungen und Probleme ist eine axiomatische Begründung ihrer Gesetze nicht der rechte Ausgangspunkt; vielmehr muß der Studierende den langen und beschwerlichen Weg von der unmittelbaren Erfahrung bis zu der Erkenntnis, daß eine Abstraktion des physikalischen Geschehens in der vom Verf. gegebenen Weise nicht nur möglich und zweckmäßig ist, sondern auch in der Natur der Sache liegt, wohl stets erst selbst zurücklegen. Für den Fortgeschrittenen aber und für den Kenner der Materie sind gerade die rein physikalischen und axiomatischen Teile des Buches eine reiche Fundgrube für neue Blickrichtungen und Gesichtspunkte (man betrachte z. B. die durchaus originale Einführung der quantentheoretischen Grundbegriffe), für die dem Verf. viele Kollegen Dank wissen werden. F. SAUTER (Göttingen).

Eingegangen am 13. November 1950.

Broglie, Louis de: Physik und Mikrophysik. Hamburg: Claassen. 1950. 350 S. u. 8 Abb. DMark 16.50.

Wie in seinen beiden früheren Büchern „Licht und Materie" und „Die Elementarteilchen" versucht der berühmte französische Physiker LOUIS DE BROGLIE, die Probleme der modernen Physik dem Verständnis der Allgemeinheit näher zu bringen. Dem Verf. ist diesmal besonders daran gelegen, einerseits die Zwischenstellung, die die Physik gegenüber der Philosophie und der Technik besitzt, herauszuarbeiten. Andrerseits ist es ihm ein Bedürfnis, aufzuzeigen, wie man zu den großartigen Entdeckungen der Physik gelangt ist.

So bespricht der Verf. im 1. Teil des Buches die grundlegenden Gedanken der modernen Physik, wobei er immer bestrebt ist, auf ihre Auswirkungen in der Technik hinzuweisen. Als Beispiel hierfür seien die von ihm vorausgesagten Materiewellen und ihre Anwendung auf die Untersuchung von Oberflächenschichten genannt. Im 2. Teil werden die erkenntnistheoretischen Folgerungen dieser Gedanken besprochen. Dabei ist es besonders reizvoll zu sehen, wie sich die begrifflichen Vorstellungen der Physik im Lauf ihrer Entwicklung gewandelt haben. Als Beispiel schildert der Verf. aus eigenem Erleben, wie man die Deutung der Materiewellen als Wellen in Raum und Zeit verlassen mußte, um sie durch eine statistische Deutung zu ersetzen. Der 3. Teil stellt einige Episoden aus der Geschichte der Physik, insbesondere der französischen Physik dar. Auch hier wird das Zusammenspiel von reiner Wissenschaft und Technik geschildert. Besonders eindrucksvoll kommt das in den Abschnitten zum Ausdruck, an deren Entwicklung der Verf. tätigen Anteil genommen hat (Entwicklung der Radiotelegraphie). Zum Schluß geht DE BROGLIE auf die Hoffnungen und Gefahren der modernen Entwicklung ein. Er weist auf die Aufforderung des Philosophen BERGSON hin, daß man sich um die „Ergänzung der Seele" bemühen müsse, um die Macht, die uns die physikalischen Mittel verleihen, zum Guten zu gebrauchen.

So stellt dieses Buch wieder einen Beitrag zu den Bestrebungen dar, die so reizvolle physikalische Gedankenwelt dem gebildeten Laien vertrauter zu machen. Die Anschaulichkeit und der vollendete Stil seiner Darstellung, der auch in der Übersetzung nichts verliert, wird dem Buch viele Freunde erwerben. E. TREFFTZ (Göttingen).

Eingegangen am 3. November 1950.

Gombas, P.: Theorie und Lösungsmethoden des Mehrteilchenproblems der Wellenmechanik. Basel: Birkhäuser 1950. 268 S. u. 20 Abb. Brosch. sfr. 24.50; geb. sfr. 29.50.

Seitdem die Quantenmechanik, soweit sie sich auf die nichtrelativistische Beschreibung des Atom- und Molekelbaus bezieht, als eine axiomatisch formulierbare, in sich geschlossene „klassische Theorie" gelten kann, mag es angemessen sein, ein wichtiges Teilgebiet in einer gesonderten Monographie zu behandeln, wobei die Auswahl der Gegenstände zwangsläufig dem Geschmack des Autors anheimgegeben bleibt. Die Begrenzung des behandelten Stoffes ist enger, als der Titel besagt; es werden nur die exakten und Näherungsmethoden zur Berechnung der *Grundzustände* von Atomen und Molekeln behandelt, nicht aber die Theorie der Spektren. Innerhalb dieses eng gesteckten Rahmens ist die Darstellung aber sehr ausführlich und stellt geringe geistige Anforderungen an den Leser (abgesehen von der Voraussetzung einiger Vertrautheit mit Differentialgleichungen).

Als Grundlage wird die SCHRÖDINGER-Gleichung für mehrere Teilchen axiomatisch vorausgesetzt und am Einteilchenproblem des Wasserstoffatoms ausgiebig erläutert. Bei der Besprechung der Grundzustände der Atome im periodischen System wird das RUSSEL-SAUDERSsche Kopplungsschema angegeben, aber nicht weiter begründet. Die allgemein entwickelten Methoden werden an wenigen Beispielen (He-Atom, H_2^+- und H_2-Molekel) ausführlich vorgerechnet.

In einem besonderen Kapitel, dessen Verständnis jedoch nicht Voraussetzung für das Studium der übrigen Teile des Buches ist, wird der Zusammenhang zwischen SCHRÖDINGER-Gleichung und der sog. Feldquantelung erörtert. Ein weiteres Kapitel, das aus dem übrigen Rahmen des Buches heraustritt, ist einer sehr knappen Darstellung der statistischen Thermodynamik von mikrokanonischen PAULI-, FERMI- und BOSE-Gesamtheiten gewidmet, mit Hinweisen auf die PLANCKsche Strahlungsformel und das entartete Elektronengas, letzteres unter Berücksichtigung der elektrostatischen Wechselwirkung der Elektronen. JENSEN (Heidelberg).

Eingegangen am 18. November 1950.

Kainer, Franz: Kohlenwasserstoffsynthese nach Fischer-Tropsch. Berlin-Göttingen-Heidelberg: Springer 1950. VII, 322 S. u. 40 Abb. Geb. DMark 39.60.

Der Verf. hat sich mit vorliegendem Werk das Verdienst erworben, erstmalig im deutschen Schrifttum eine zusammenfassende Behandlung des weiten Gebietes der Kohlenwasserstoffsynthese durch Kohlenoxydhydrierung gegeben zu haben.

Das Buch behandelt in seinen Hauptteilen 1. die Herstellung geeigneter Katalysatoren, 2. die Gewinnung und Reinigung von Synthesegasen, 3. Ausführungsformen der Synthese und 4. Eigenschaften und Weiterverarbeitung der Syntheseprodukte.

Als Anhang wird eine ausführliche Zusammenstellung von deutschen und ausländischen Patentschriften gegeben. Die Darstellung greift hauptsächlich zurück auf die Angaben der Patentliteratur und läßt dadurch allerdings die kritische Sichtung des Wertvollen von Überholtem häufig vermissen. So wird der Leser sich an Hand des Buches kein zuverlässiges Bild über den letzten Stand der technischen Ausführung und Betriebsweise der deutschen Fischer-Tropsch-Werke machen können, obschon diese in zahlreichen ausländischen Berichten der letzten Jahre behandelt sind. Von Nutzen wird das Buch in erster Linie sein, um eine schnelle Orientierung über Vorveröffentlichungen zur Bearbeitung von Patentfragen auf dem Gebiete der Kohlenwasserstoffsynthese zu erreichen.

GRIMME (Utfort über Moers).

Eingegangen am 16. November 1950.

Steinhaus, Edward A.: Principles of Insect Pathology. New York, N. Y. a. London: McGraw-Hill Book Company, Inc. 1949. 757 S., 219 Abb. u. etwa 5000 Literaturangaben. $ 8 oder 68 s.

Die Insektenpathologie ist an der California-Universität zum selbständigen akademischen Fach entwickelt worden. Der Verf. hat sein ursprünglich als Lehrbuch gedachtes Werk sehr stark erweitert. Wenngleich das Buch nicht die gesamte Weltliteratur vollständig referiert — was weit über seinen Umfang hinausgehen würde —, ist es doch der erste und überaus erfolgreiche Versuch, die Grundzüge der Insektenpathologie in allen ihren Disziplinen zusammenfassend darzustellen. Nach einem einleitenden Kapitel, welches insbesondere auch die Geschichte des Faches erwähnt, werden die pathologischen Auswirkungen mechanischer, physikalischer und chemischer Schädigungen sowie des Befalls durch ekto- und entoparasitische Insekten oder Milben gebracht. Von besonderem Interesse ist dabei die Histopathologie der Vergiftungen mit modernen Kontaktinsektiziden. Das 3. Kapitel befaßt sich mit Ernährungs- und Metamorphoseschäden, während die beiden nächsten extra- und intrazelluläre Mikroorganismen gesunder Insekten besprechen. Weiterhin werden die Probleme der Resistenz und Immunität sowie allgemeine insektenpathologische Symptome umfassend dargestellt. Die sehr ausführlichen Kapitel 9 bis 11 behandeln die Infektionen durch Bakterien, Pilze und Viren, welche einerseits als Krankheitserreger von Nutzinsekten (Bienen, Seidenraupen u. a.) und andererseits insbesondere durch die Dezimierung von Schädlingen eine erhebliche wirtschaftliche Bedeutung besitzen. Weitere Kapitel enthalten Infektionen durch Protozoen und Nematoden. In einem abschließenden Abschnitt werden allgemeine Ausblicke auf den Gebrauch pathogener Mikroorganismen zur Bekämpfung von Insektenkalamitäten diskutiert. Dem vom Verlag vorzüglich ausgestatteten und reich bebilderten Werk ist wegen der großen wirtschaftlichen Bedeutung der Insekten eine recht weite Verbreitung zu wünschen.

KLOFT (Würzburg).

Eingegangen am 20. November 1950.

Riezler, Wolfgang: Einführung in die Kernphysik. Berlin-Buxtehude: Hermann Hübener 1950. 253 S. u. 134 Abb. Gzl. DMark 17.50; brosch. DMark 16.—.

Die Neuauflage des Buches, das sich seit langem als eine der besten Einführungen in die Kernphysik bewährt hat, hat erfolgreich mit der stürmischen Entwicklung auf diesem Gebiet Schritt gehalten, ohne daß sein bisheriger Rahmen gesprengt wurde. Es wendet sich an einen weiten Kreis, an Studenten der Physik sowohl wie an die wachsende Zahl von Vertretern anderer naturwissenschaftlicher Gebiete, denen ein Verständnis der kernphysikalischen Vorgänge für ihre eigene Arbeit notwendig wird. Der Würdigung in einer amerikanischen Besprechung: „Mit Rücksicht auf den weiten Leserkreis ist das Buch fast ganz ohne mathematische Symbole und Formeln geschrieben. Trotz dieses Verzichts auf das solideste beschreibende Hilfsmittel des Physikers ist die Darstellung bemerkenswert präzise, exakter als in vielen Büchern, die größere Anforderungen an mathematischen Voraussetzungen beim Leser stellen", möchte sich der Ref. unbedingt anschließen.

Der gelungenste Teil des Buches sind zweifellos die Kapitel, die der Beschreibung der Kernbausteine, der Kernstruktur und der Kernreaktionen gelten. Hier spürt man noch etwas von RUTHERFORDschem Geist, der in seiner Schlichtheit und seinem Blick für das Wesentliche alle Pionierarbeiten in der experimentellen Erforschung des Atomkerns bestimmt hat.

Das ausführliche Kapitel über Methoden und apparative Hilfsmittel zu Kernuntersuchungen ist offenbar mehr zur allgemeinen Orientierung des Lesers gedacht denn als Einführung für einen jungen Forscher, der sich auf diesem Gebiet versuchen will. Ein gewisser Widerstreit beim Autor selbst über diese beiden möglichen Absichten hat vielleicht das Kapitel etwas inhomogen gemacht; dem ersten Zweck hätte es bei größerer Kürze gleich gut gedient. Immerhin gewinnt man einen guten Eindruck von den hohen Anforderungen an physikalischem Können auf verschiedensten Gebieten, die die Kernphysik längst aus der Enge eines Spezialgebietes herausgeführt haben.

Das Schlußkapitel über Anwendungen der Kernphysik mußte bei der stürmischen Entwicklung gerade dieses Zweiges notwendig aphoristisch bleiben. Vielleicht hat der Umstand, daß der Autor in einzelnen Anwendungsgebieten selbst wichtige Beiträge geleistet hat, dazu geführt, daß nicht ganz herauskommt, in wie weitem Maße die Kernphysik schon viele Gebiete von Technik und Wissenschaft durchdrungen hat.

JENSEN (Heidelberg).

Eingegangen am 18. November 1950.

Kalmus, Hans: Einfache Experimente mit Insekten. Aus dem Englischen übersetzt von Anna Kalmus. Basel: Birkhäuser 1950. 197 S. u. 39 Abb. Geb. 9,75 sfr.

Mit dem vorliegenden Buch will der Verf., wie er selbst im Vorwort sagt, den Liebhabern der Entomologie zeigen, daß die moderne Insektenkunde in steigendem Maße eine experimentelle Wissenschaft ist. Sein Ziel ist, Liebhabern und Schülern an Hand einfacher Versuche eine erste Einführung in diesen Zweig der Entomologie zu geben. Das ist ihm in vollem Umfang gelungen. Es sind keine Spielereien, sondern ernsthafte Versuche, die allerdings keine oder nur eine einfache Apparatur erfordern. Darin liegt aber gerade der Wert des Buches. Viele der angeführten Versuche sind auch für physiologische Kurse an Hochschulen geeignet, zumal der Verf. für jeden die Originalliteratur angibt, die eine Vertiefung der Fragestellung ermöglicht. Die Auswahl umfaßt Experimente aus den Gebieten des Stoffwechsels, der Verdauung, Atmung, Ortsbewegung, über die Bedeutung der Kutikula und Epidermis, aus der Sinnesphysiologie, der Physiologie des Wachstums, des Verhaltens und aus der Populationsforschung. Einige Zuchtanweisungen und die Literaturhinweise beschließen den kleinen Band. Die Ausstattung entspricht der gediegenen Form, die alle Veröffentlichungen des Verlages auszeichnet.

H. AUTRUM (Göttingen).

Eingegangen am 29. November 1950.

Ergänzung und Berichtigung

zu der Arbeit „Hundert Jahre BRAVAIS-Gitter". Naturwiss. **37**, 385—390 (1950).

Die in obiger Abhandlung wiedergegebenen, von BRAVAIS gemachten Winkelangaben für Rhomboeder bedeuten den „inneren" Winkel (nicht den Flächennormalen-Winkel) zwischen den symmetrisch um die dreizählige Achse gelegenen Rhomboederflächen. Heute ist es jedoch üblich, ein Rhomboeder durch den Winkel zu charakterisieren, den die Achsen miteinander bilden, durch den Rhomboederwinkel α. Daraus ergeben sich folgende Änderungen:

Seite 387 letzter Absatz, Zeile 17: lies 60° statt 70°31′44″.
Seite 388 erster Absatz, Zeile 3: lies 109°28′12″ statt 120°.
Seite 388 Tabelle 1, vierte Spalte: statt Rhomboeder von 70°31′44″ lies: Rhomboeder mit $\alpha = 60°$; statt Rhomboeder von 120° lies: Rhomboeder mit $\alpha = 109°28'12''$. Wo sonst in dieser Spalte Rhomboeder steht lies: Prisma.

H. WINKLER (Göttingen).

Verantwortlich für den Textteil: Prof. Dr. Ernst Lamla, Göttingen. — Springer-Verlag, Berlin · Göttingen · Heidelberg.
Druck der Universitätsdruckerei H. Stürtz AG., Würzburg.

Handbuch der analytischen Chemie

Bearbeitet von zahlreichen Fachgelehrten

Herausgegeben von

W. Fresenius und **G. Jander**
Wiesbaden Greifswald

Zweiter Teil

Qualitative Nachweisverfahren

Band I a. **Elemente der ersten Hauptgruppe** (einschl. Ammonium). Wasserstoff. Lithium. Natrium. Kalium. Ammonium. Rubidium. Caesium. Mit 80 Abbildungen. XII, 222 Seiten. 1944. DMark 30.—; gebunden DMark 33.—

Band III. **Elemente der dritten Gruppe.** Bor. Aluminium. Gallium. Indium. Thallium. Scandium. Yttrium. Elemente der seltenen Erden (Lanthan bis Cassiopeium). Actinium. Mit 13 Abbildungen und 1 Tafel. XII, 196 Seiten. 1944. DMark 27.—

Band VI. **Elemente der sechsten Gruppe.** Sauerstoff. Schwefel. Selen. Tellur. Chrom. Molybdän. Wolfram. Uran. Mit 61 Abbildungen. XII, 267 Seiten. 1948. DMark 39.—

Dritter Teil

Quantitative Bestimmungs- und Trennungsmethoden

Band I a. **Elemente der ersten Hauptgruppe** (einschl. Ammonium). Lithium. Natrium. Kalium. Ammonium. Rubidium. Caesium. Mit 31 Abbildungen. XV, 404 Seiten. 1940. DMark 51.—

Band II a. **Elemente der zweiten Hauptgruppe.** Beryllium Magnesium. Calcium. Strontium. Barium. Radium und Isotope. Mit 13 Abbildungen. XI, 446 Seiten. 1940. DMark 57.—

Band II b. **Elemente der zweiten Nebengruppe.** Zink. Cadmium. Quecksilber. Mit 46 Abbildungen. XI, 587 Seiten. 1945. DMark 70.—; gebunden DMark 72.50

Band III. **Elemente der dritten Gruppe.** Bor. Aluminium. Gallium. Indium. Thallium. Scandium. Yttrium. Elemente der seltenen Erden (Lanthan bis Cassiopeium). Actinium und Mesothor 2. Mit 37 Abbildungen. XI, 852 Seiten. 1942. Vergriffen

Band IV b. **Elemente der vierten Nebengruppe.** Titan. Zirkon. Hafnium. Thorium. Mit 25 Abbildungen. XVI, 524 Seiten. 1950. DMark 78.—

Band V a γ. **Elemente der fünften Hauptgruppe.** Arsen. Antimon. Wismut. Mit 45 Abbildungen. XIV, 711 Seiten. 1951. DMark 108.—

Band VII a α. **Elemente der siebenten Hauptgruppe I.** Wasserstoff (einschl. Wasser), Fluor. Mit 86 Abbildungen. XIII, 245 Seiten. 1950. DMark 38.—

Band VIII a. **Elemente der achten Hauptgruppe.** Edelgase: Helium. Neon. Argon. Krypton. Xenon. Radon und Isotope. Mit 53 Abbildungen. XII, 120 Seiten. 1949. DMark 19.60

SPRINGER-VERLAG / BERLIN · GÖTTINGEN · HEIDELBERG

Physiologische Chemie

Ein Lehr- und Handbuch für Mediziner, Biologen und Chemiker

Hervorgegangen aus dem Lehrbuch der physiologischen Chemie

von

Olof Hammarsten

In 2 Bänden

In Kürze erscheint:

Erster Band

Die Stoffe

Herausgegeben von **B. Flaschenträger** Alexandria

Unter Mitwirkung von **E. Lehnartz** Münster/Westf.

Bearbeitet von D. Ackermann, G. Blix, H. Bredereck, P. Brigl †, A. Butenandt, K. Felix, B. Flaschenträger, F. Flury †, K. Freudenberg, K. Gemeinhardt, W. Grassmann, Chr. Grundmann, F. Holtz, E. Klenk, F. Knoop †, H. Kraut, W. Kuhn, H. Müller, Th. Ploetz, F. Schneider, G. Schramm, W. Siedel, T. Thunberg, J. Trupke, R. Weidenhagen, Ä. Weischer, K. Zeile. Mit etwa 95 Abbildungen. Etwa 1420 Seiten. 1951.

Ganzleinen etwa DMark 186.—

Inhaltsübersicht:

A. Einleitung. Von F. Knoop †. — **B. Physikalisch-chemische Grundlagen biologischer Vorgänge.** Von W. Kuhn. I. Allgemeines über Atom- und Molekülbau sowie Radioaktivität und Röntgenstrahlen. II. Äußere Elektronenhülle in Atomen und Molekülen. III. Chemische Thermodynamik, chemisches Gleichgewicht. IV. Elektrische Potentiale, Elektrolyte. V. Grenzflächen der Zelle und ihre Eigenschaften. Va. Durchlässigkeit von Membranen und Membrangleichgewichte. Vb. Oberflächenspannung. VI. Kolloidaler Zustand. VII. Die Zelle als physikalisch-chemisches System. — **C. Die anorganischen und organischen Bau-, Betriebs- und Schlackenstoffe.** Einteilung der Stoffe. Zusammensetzung des Menschen. Von B. Flaschenträger. I. Wasser. Von F. Holtz. II. Mineralstoffe. Von F. Holtz und B. Flaschenträger. III. Kohlenhydrate. 1. Zucker und Verwandte. Von P. Brigl † und Th. Ploetz. 2. Polysaccharide. Von Th. Ploetz und K. Freudenberg. IV. Fette und Lipoide (Lipide). 1. Die eigentlichen Fette. 2. Phosphatide. 3. Zuckerhaltige Lipoide. 4. Wachse und andere Fettgemische. Von E. Klenk. 5. Steroide. Von A. Butenandt und G. Schramm. 6. Carotinoide. Von Chr. Grundmann. V. Eiweißstoffe und ihre Abbaustufen. 1. Einleitung. Von W. Grassmann. 2. Aminosäuren und Peptide. Von W. Grassmann, F. Schneider und J. Trupke. 3. Eiweißstoffe. Von G. Blix, K. Felix, W. Grassmann und J. Trupke. 4. Tierische Basen. Von D. Ackermann. VI. Purin- und Pyrimidinverbindungen. Von H. Bredereck. 1. Purine. 2. Pyrimidine. 3. Vitamin B_1, Aneurin. 4. Pterine. 5. Nucleinsäuren. 6. Nucleinsäurespaltende Fermente (= Nucleasen). VII. Pyrrolfarbstoffe. 1. Blutfarbstoffe, Häminfermente, Zellhämine, natürliche Porphyrine. Von K. Zeile. 2. Gallenfarbstoffe. Von W. Siedel. 3. Blattfarbstoffe. Von K. Zeile. 4. Prodigiosin. Von K. Zeile. VIII. Enzyme. 1. Allgemeiner Teil. Von W. Grassmann und J. Trupke. 2. Spezieller Teil. Von W. Grassmann, H. Kraut, H. Müller, Th. Ploetz, T. Thunberg, R. Weidenhagen und Ä. Weischer. IX. Anhang: Tierische Gifte. Von F. Flury † und K. Gemeinhardt. Namen- und Sachverzeichnis.

Das von den Fachkreisen lange und schmerzlich erwartete, repräsentative Werk über Physiologische Chemie beginnt jetzt zu erscheinen. Hervorgewachsen aus dem zu seiner Zeit hervorragenden Lehrbuch von Olof Hammarsten, hat es unter der Hand seiner Herausgeber eine eigene Form gefunden. Festgehalten wurde an der Trennung in zwei Teile, von denen der erste, zunächst erscheinende, die chemischen Bausteine der Organismenwelt behandelt, während die Schilderung der chemischen Umsetzungen, also der funktionellen Vorgänge, dem in Vorbereitung befindlichen zweiten Band vorbehalten bleibt. Wie ein Blick auf das Inhaltsverzeichnis lehrt, sind zur Bearbeitung der einzelnen Abschnitte jeweils diejenigen Forscher herangezogen worden, die sich bei der Entwicklung der betreffenden Gebiete einen besonderen Ruf erworben haben. Ihre Leistung, unter den ungeheuer erschwerten Bedingungen der Nachkriegszeit die umfangreiche Literatur der letzten zehn Jahre der ursprünglichen, von den Bomben vernichteten ersten Fassung organisch einverleibt zu haben, kann nicht hoch genug gewürdigt werden. — Besondere Beachtung verdient das umfangreiche Register, in dem nicht nur Namen der Autoren und Stichwörter, sondern auch die im Text behandelten Literaturquellen nachgewiesen werden.

Etwa ein Jahr nach Ausgabe des ersten Bandes wird der zweite Band:

Physiologische Chemie der Lebensvorgänge und Organe

erscheinen.

SPRINGER-VERLAG / BERLIN · GÖTTINGEN · HEIDELBERG

Herausgeber und verantwortlicher Redakteur: Professor Dr. Ernst Lamla, Göttingen. — Verantwortlich für den Anzeigenteil: Hans-Georg Halfter, Berlin W 35, Reichpietschufer 20. — Springer-Verlag, Berlin · Göttingen · Heidelberg. — Druck der Universitätsdruckerei H. Stürtz AG., Würzburg. — Printed in Germany.